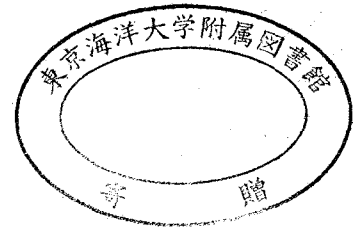


操船者特性に基づいた操船支援システムに関する研究

著者	遠藤 政利
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	2002
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000615/



操船者特性に基づいた 操船支援システムに関する研究

平成 14 年度
(2002)

東京商船大学大学院
商 船 学 研 究 科
交通システム工学専攻
遠 藤 政 利

目 次

1. 緒言	．．． 1
1.1. <u>本論文の目的</u>	．．． 1
1.2. <u>本論文の構成</u>	．．． 2
2. 航路航行操船における操船者支援	．．． 3
2.1. <u>航路航行操船における人間特性の導出</u>	．．． 3
2.1.1. 航路航行操船における最適制御	．．． 3
2.1.2. 最適制御定数と操船者特性	．．． 4
2.1.3. 航路航行操船における操船者モデル	．．． 4
2.2. <u>航路航行操船における操船者の制御特性</u>	．．． 5
2.2.1. 操船者の制御特性評価	．．． 5
2.2.1.1. 自動制御系の評価	．．． 5
2.2.1.2. 系の安定性と応答特性	．．． 6
2.2.2. 周波数特性	．．． 6
2.2.3. 操舵による船体運動の応答特性	．．． 11
2.2.4. 適応制御特性	．．． 15
2.3. <u>操船者支援のための方策</u>	．．． 17
2.3.1. 適応制御特性を利用した操船者支援	．．． 17
2.3.2. 状態変数表示の操船者特性に与える影響	．．． 18
2.3.3. 状態変数表示による操船者特性改善	．．． 25
2.4. <u>操船者支援</u>	．．． 30
2.4.1. 状態変数の表示方法	．．． 30
2.4.1.1. 状態変数表示の制御的意味	．．． 30
2.4.1.2. 状態変数表示画面の基本構想	．．． 30
2.4.1.3. 状態変数表示画面	．．． 32
2.4.2. 状態変数表示実験	．．． 36
2.4.3. 操船支援実験結果	．．． 37
2.4.4. 操船支援表示による効果	．．． 43
2.5. <u>本章のまとめ</u>	．．． 46

3. 避航操船における操船者支援	・・・48
3.1. <u>人間の情報処理の限界</u>	・・・48
3.1.1. 人間の情報処理	・・・48
3.1.2. 情報処理能力の限界	・・・49
3.1.3. 情報処理における支援	・・・50
3.2. <u>避航操船における操船者の負荷</u>	・・・52
3.2.1. 避航操船における操船者の情報処理	・・・52
3.2.2. 操船者に影響を与える負荷要因	・・・52
3.2.3. 操船者の情報処理能力の限界	・・・53
3.2.4. 操船者の情報処理の支援	・・・55
3.3. <u>避航操船における操船者支援</u>	・・・57
3.3.1. 他船行動を確定化する情報表示	・・・57
3.3.1.1. 他船動向の不確定性	・・・57
3.3.1.2. 他船動向を確定化する情報	・・・57
3.3.1.3. 他船動向を確定化する情報表示画面	・・・58
3.3.2. 行き先と変針点情報表示による操船者支援実験	・・・61
3.3.3. 行先と変針点情報表示による操船者支援実験結果	・・・65
3.3.3.1. 航跡図	・・・65
3.3.3.2. 他船動向による操船への影響	・・・68
3.3.3.3. DCPA	・・・73
3.3.3.4. 実験結果のまとめ	・・・78
3.3.4. 輻輳状態への適用	・・・78
3.4. <u>本章のまとめ</u>	・・・80
4. 結言	・・・81
5. 克服すべき課題と将来への展望	・・・82
6. 謝辞	・・・84
参考文献	・・・85

1. 緒言

近年、操船者を取り巻く環境は変化してきており、操船者が船の安全運行に果たす責任も大きくなってきている。特に、船体の大型化に伴い海難事故による影響も大きなものとなっている。こうした海難事故原因の大半にはヒューマンエラーの介在が指摘されて久しい。ヒューマンエラー発生原因は様々なものが考えられるが、操船システムにも改善できる余地があるものと考えられる。

一方で 10 数年前より IBS に代表されるように One Man Bridge 化に対応させるべく新たな操船システムや ECDIS、AIS などに代表される航海情報表示機器などの開発も進められてきている。しかし、これらの機器類は機能面での充実は図られてはいるものの、具備されている機能の操船者に対する有用性が詳細に分析されているとは限らない。

ここにおいて、人間特性を考慮した操船者に対する支援を行うことでヒューマンエラー発生要因を逡減させるとともに操船結果の向上が可能になると考えられる。

したがって、本研究では操船者の人間特性を明らかにするとともに、このような操船者特性を改善することで操船結果の向上を図ることができる操船支援システムの開発を目指す。

1.1. 本論文の目的

本論文の目的は操船結果の向上を図る目的で操船者に対する支援方法を明らかにすることである。ここでは操船者の人間特性を改善するための仕組みを明らかにする。そのために、基本的な操船場面として航路航行操船と避航操船を取り上げる。

まず、航路航行操船では操船者の人間特性、特に適応制御特性を利用した支援を行う。操船者は制御対象である船の船長変化に応じて操船者自身の制御特性を適応させることで船体制御を行っている。これが操船者の適応制御特性として認められている人間特性であるが、船長が大きくなると船体の操縦性能は悪くなることから操船者の適応制御特性に限界をもたらすことが一般的である。したがって、船長が大きな船に対して操船者を支援して、適応制御特性を船体の制御特性に良好に適応させることで、船体制御結果の向上を図ることを目的とした。

次に、現状の操船システムにおいて操船者の負荷が高い操船場面として避航操船を取り上げ、高負荷状態における操船支援を検討する。

避航操船では操船者が高負荷状態に置かれると本来の情報処理能力が限界となることから、操船者の情報処理能力を支援する必要性が生じる。避航操船における操船者の高負荷状態の要因は他船行動の不確実性、複数の見合い関係の発生、航行可能域の制限が考えられる。ここでは、これらの要因のうち、他船行動を確定事象とすることで高負荷状態の軽減を図ることを避航操船における操船支援と考えた。

このために必要な他船行動に関する情報を検討し、このための情報表示を行って他船行動を確定事象とすることで操船者の情報処理能力の支援を行う。

1.2. 本論文の構成

本研究では基本的操船場面として航路航行操船と避航操船を対象に操船者の人間特性に基づいた操船支援方法を明らかにするものである。

そのために、航路航行操船における操船支援については、第2章で航路航行操船における人間特性を説明するために航路航行における最適制御から操船者モデルを導入し、さらに操船者特性はPID制御で表されることを示す。また、操船者の一般的制御特性から小型船と大型船についての相違について述べる。さらに、操船者には船長Lの相違に対する適応制御特性があることを説明する。次に、操船者の適応制御特性を操船支援の対象として、操船者制御係数を改善することで大型船の制御結果向上が行えることを示す。ここでは、そのために操船者制御係数と船体運動の関係を論じ、操船者制御係数を改善するために横偏位量、船首方位偏角、回頭角速度の状態変数を表示する方法について提案する。さらに現状で唯一の操船支援機器である回頭角速度計を取り上げ、回頭角速度計の有無により操船者特性を表す操船者制御係数の一つである回頭角速度制御係数がどのように変化するかを示す。これにより、状態変数を表示することで対応する制御係数が改善されることを示し、横偏位量、船首方位偏角を表示することでそれぞれに対応する制御係数が改善できる可能性のあることを示す。また、操船者に対する従来の表示方法の問題点を示す。そして、この問題点を解決し、横偏位量、船首方位偏角、回頭角速度の状態変数を表示することで操船者の適応制御特性が改善されることを操船シミュレータ実験によって示す。

避航操船における操船支援については第3章で現状の避航操船における問題点を検討する。特に操船者に対する負荷が高い状況における要因を検討する。そして、これらの要因の中から他船行動の不確実性が操船者に与える影響を明らかにする。また、これらの検討を避航操船における操船支援の目的を明確にするとともに他船行動の確定化についての検討を行う。以上の検討をもとにAISを利用して他船行動を確定化する表示方法の有効性を操船シミュレータ実験によって示す。また、この表示ではIMOによってAISで推奨されている他船の行き先表示のみの場合と変針点情報表示による比較実験を行い、本研究で提案した避航操船における支援方法が有効なことを示す。

2. 航路航行操船における操船者支援

2.1. 航路航行操船における人間特性の導出

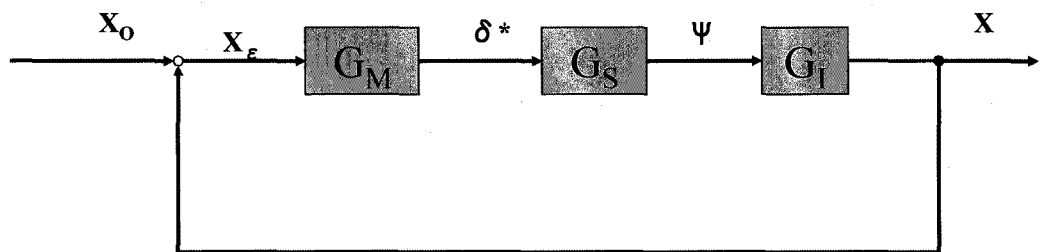
航路航行操船は設定航路線に対する現在船位の横偏位をできるだけ小さくしながら設定航路に追従する操船である。

操船者は自船の船位を把握し、設定航路線からの横偏位を絶えず確認する。そして設定航路線から船位が偏位している場合、それを解消しつつ設定航路線に戻すように船体を制御する。したがって、航路追従操船においては船位の確認と舵による制御が必要となる。以下に航路追従操船における操船者制御モデルを説明する。

2.1.1. 航路航行における最適制御

航路航行操船において対象とする操船システムは図 2.1 に示すフィードバックループで表され、船体を制御対象とした時、操船者をコントローラと見なすことができる。図中、 G_M は操船者の操縦制御特性、 G_S は船体制御特性、 G_I は積分要素を表す。

この場合、コントローラとしての操船者モデルは、船首方位と目的航路線に追従する針路との針路偏差（船首方位偏角）、回頭角速度および目的航路線からの横偏位量を状態変数とし、操舵量を操作量として表される。



X_0 : Command Position

X : Current Position

Ψ : Heading

図 2.1 操船システム制御ブロック線図

ここで、操船者の操縦制御特性は航路航行における自動制御系の最適制御モデルとして表される。航路航行のように可航水域が制限される水域を航行する場合には、設定航路線からの偏位を最小にする船体位置制御が重要となる。そこで評価関数として次式を考える。

$$J = \int_0^{\infty} \left((x / x_{\max})^2 + (\delta / \delta_{\max})^2 \right) dt \quad (2.1)$$

式(2.1)において x_{\max} 、 δ_{\max} は横偏位量、操舵量をそれぞれ評価するための設計パラメータであり、 x 、 δ は設定航路線からの横偏位量、操舵角を表す。なお、小林らの研究により、 x_{\max} 、 δ_{\max} は船長を L とし、それぞれ、 $0.2L$ 、 15 度とすると妥当な結果が得ら

れることが報告されている。

最適制御入力 δ は式(2.2)で表される一次系操縦運動方程式に対して J を最小とする最適レギュレータ問題を解くことにより得られる。

$$K\delta = T\ddot{\psi} + \dot{\psi} \quad (2.2)$$

式(2.2)において $\ddot{\psi}$ 、 $\dot{\psi}$ はそれぞれ、回頭角速度の一階微分、回頭角速度を表し、 K 、 T は操縦性指数を表す。

式(2.2)において最適レギュレータ問題を解くと次の式が得られる。

$$\delta = K_{\psi}\psi_{\varepsilon} + K_y x_{\varepsilon} + K_{\dot{\psi}}\dot{\psi}_{\varepsilon} / v \quad (2.3)$$

ここで、 ψ_{ε} ：船首方位偏角、 x_{ε} ：横偏位量、 $\dot{\psi}_{\varepsilon}$ ：回頭角速度、 v ：船速を表す。また、式(2.3)において、 K_{ψ} 、 K_y 、 $K_{\dot{\psi}}$ は式(2.1)の最適レギュレータのフィードバック・ゲインとして与えられ、 T 、 K 、 x_{\max} 、 δ_{\max} によって決定される。

2.1.2. 最適制御定数と操船者特性

航路航行操船における自動制御系の最適制御モデルを使い、操船シミュレータによる実験から操船者制御モデルを導出した（仙田、2001年3月）。

式(2.3)において状態変数 ψ_{ε} 、 x_{ε} 、 $\dot{\psi}_{\varepsilon}$ に係わる制御定数を K_p 、 K_x 、 K_d とし、また、 K' 、 T' をそれぞれ追従性指数、旋回性指数とするとこれらの関係は次のように示される。

$$\delta = K_p\psi_{\varepsilon} + K_x x_{\varepsilon} + K_d\dot{\psi}_{\varepsilon} / v \quad (2.4)$$

ここで、操船者特性定数 H_{ψ} 、 $H_{\dot{\psi}}$ 、 H_x 、 $H_{\psi}=0.7$ 、 $H_{\dot{\psi}}=0.5$ 、 $H_x=10.5$ とすると K_p 、 K_x 、 K_d はそれぞれ、次のように正規化して表される。

$$K_p = H_{\psi} \cdot T' / K' \quad (2.5)$$

$$K_x = H_x \cdot T' / K' \cdot 1/L \quad (2.6)$$

$$K_d = H_{\dot{\psi}} \cdot T' / K' \cdot L \quad (2.7)$$

2.1.3. 航路航行操船における操船者モデル

上述した式(2.4)において x_{ε} は ψ_{ε} を微小角として次のように書くことができる。

$$x_{\varepsilon} = \int v \sin \psi_{\varepsilon} dt = \int v \left(\frac{\pi}{180} \psi_{\varepsilon} \right) dt \quad (2.8)$$

式(2.8)を式(2.4)に代入すると次式が得られる。なお、船速 v は一定とする。

$$\delta = K_p \psi_e + K_x v \frac{\pi}{180} \int \psi_e dt + \frac{K_d}{v} \dot{\psi}_e \quad (2.9)$$

いま、式(2.9)は船首方位偏角 ψ_e に関する PID 制御式と見なすことができる。すなわち、航路航行操船における操船者制御特性は ψ_e を状態変数とする PID 制御として表される。

PID 制御は比例制御 (P)、積分制御 (I)、微分制御 (D) によって対象となる系の自動制御を行う際に利用され、一般産業用としても広く利用されている。

2.2. 航路航行操船における操船者の制御特性

操船者制御定数をもとに制御対象としての船体の制御特性の相違にしたがった操船者特性を明らかにする。

2.2.1. 操船者の制御特性評価

ここでは操船者の制御特性を評価し、爾後の研究を進めていく上での基本的構想を示すことにする。

2.2.1.1. 自動制御系の評価

一般に自動制御系は、系の安定性と制御成績の観点から評価される。

このうち、系の安定性は自動制御系に要求される最も基本的な特性である。例えば、目標値に変動が加えられたり外乱が入ったりして制御系の作動が乱されても、それらの乱入が終われば短い経過時間で偏差が再び 0 に戻ることである。このような特性が強いほど系は安定である。これに反して、制御量が目標値からかけ離れて動揺を続けたり、予期しない持続振動を生じたりするような制御系は不安定である。不安定な系では、制御量を満足に制御できないことになるので実用にはならない。

また、制御成績においては目標値に対する応答出力の偏差に注目する。これは、例えば系が安定な場合にステップ状の入力に対して出力が目標値に漸近するのか、振動しながら漸近するのかによって出力に対する目標値の偏差の大きさに相違が生じる。しかし、応答が漸近形の場合でも振動形の場合でも偏差が小さい方が制御成績がよいと判断されることになる。

以上二つの観点から自動制御系は評価されることになるが、一般に系の安定性については対象となる系の周波数特性を調べ、また、制御成績については過渡特性を調べる。

ここでは、周波数特性において系の安定性判別を行う方法には Bode 線図を利用する方法、Hurwitz および Routh の方法などがあるが、安定性を判別するための指標である位相余有およびゲイン余有をベクトル軌跡上から直感的に捉えることができることから Nyquist 線図を利用することとした。

また、制御成績については操舵による船体の応答を調べ、設定航路線に対する航跡の

時系列変化を利用することにした。この場合、操舵による船体の応答はステップ上の操舵入力に対して船体がどのように応答するか、その応答の速さと応答の形状を数値シミュレーションによる航跡の時系列変化として表すことになる。したがって、操舵による船体の応答結果、すなわち、制御成績は設定航路線よりの横偏位量の変化として捉えることができる。

以上から、本論文では対象とする自動制御系の特性を明らかにするために Nyquist 線図による系の安定性と操舵による船体の応答を調べることにする。

2.2.1.2. 系の安定性と応答特性

自動制御系において系の安定性は制御目的を充足する上での十分条件ではあるが、系が安定であるからといって必ずしも所期の制御目標を満足するものではない。

航路航行の場合、変針の際のステップ状の操舵入力に対する船体の応答は航跡の時系列変化として表されるが、その航跡は設定航路線に漸近する場合と減衰振動する場合に分類できる。操舵による船体の応答がこのどちらの形状を示すかは船体の制御特性に依存することになる。

すなわち、通常、小型船では追従性、旋回性はともに良好であることから操舵による船体の応答は減衰振動しながら設定航路線に漸近する。

他方、大型船では追従性、旋回性ともに悪いため、操舵による船体の応答は遅れ時間を有して設定航路線に漸近する。

従って、小型船では船体の応答は設定航路線を中心とした減衰振動によるオーバーシュートが認められるのに対し、大型船では設定航路線に対するアンダーシュートが認められる。

一般に制御成績の点からは目標値と制御出力との偏差は減衰振動形の応答の方が漸近形の応答よりも小さくなる。したがって、設定航路線からの横偏位量は小型船の方が大型船より小さくなる。

本研究ではこれらの一般的な船体の制御特性を念頭に、操船システムにおける系の安定性ととも操舵による船体の応答特性に着目して操船支援システムの構築を目指すこととする。

すなわち、大型船においても小型船と同様に、系の安定性を維持しつつ、操舵による船体の応答を設定航路線に対してオーバーシュートしながら減衰振動させるような船体制御を行うように操船者特性を変えていくことを考える。

2.2.2. 周波数特性

まず、図 2.1 で示したフィードバック系において、伝達関数を求める。

式(2.8)の一階微分を求める。

$$\dot{x}_e = \frac{\pi}{180} v \psi_e \quad (2.10)$$

これを ψ_ε について解くと次式が得られる。

$$\therefore \psi_\varepsilon = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\dot{x}_\varepsilon}{v} \quad (2.11)$$

さらに微分すると次式が得られる。

$$\therefore \dot{\psi}_\varepsilon = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\ddot{x}_\varepsilon}{v} \quad (2.12)$$

そして、式(2.11)と式(2.12)を式(2.4)に代入すると次式のように書き換えられる。

$$\delta = K_x x_\varepsilon + \frac{180}{\pi} \frac{K_p}{v} \dot{x}_\varepsilon + \frac{180}{\pi} \frac{K_d}{v^2} \ddot{x}_\varepsilon \quad (2.13)$$

図 2.1 に示した伝達関数をそれぞれ求める。まず、操船者の操縦制御特性 G_M は式(2.13)の両辺をラプラス変換すると、次式のように示される。

$$G_{M(s)} = \frac{\delta^*(s)}{X_\varepsilon(s)} = \frac{180}{\pi} \frac{K_d}{v^2} s^2 + \frac{180}{\pi} \frac{K_p}{v} s + K_x \quad (2.14)$$

また、船体制御特性 G_S は式(2.2)の一次系応答式をラプラス変換して次のように示される。

$$G_{S(s)} = \frac{\Psi(s)}{\delta^*(s)} = \frac{K}{Ts^2 + s} \quad (2.15)$$

積分要素 G_I は式(2.8)をラプラス変換すると次のように示される。

$$\therefore X = \frac{\pi}{180} \cdot v \cdot \frac{1}{s} \Psi \quad (2.16)$$

したがって、次式が得られる。

$$\therefore G_{I(s)} = \frac{X(s)}{\Psi(s)} = \frac{\pi}{180} \frac{v}{s} \quad (2.17)$$

したがって、一巡伝達関数を $G(s)$ 、総合伝達関数を $W(s)$ とおき、式(2.14)、式(2.15)、式(2.17)を使うと次のように示される。

$$G_{(s)} = G_M \cdot G_S \cdot G_I = \frac{\delta^*}{X_\varepsilon} \cdot \frac{\Psi}{\delta^*} \cdot \frac{X}{\Psi} = K \frac{\left(\frac{K_d}{v}\right)s^2 + K_p s + (\pi/180)K_x v}{s^2(Ts + 1)} \quad (2.18)$$

$$W_{(s)} = \frac{G_{(s)}}{1 + G_{(s)}} = K \frac{\left(\frac{K_d}{v}\right)s^2 + K_p s + (\pi/180)K_x v}{Ts^3 + \left(1 + \frac{KK_d}{v}\right)s^2 + KK_p s + K(\pi/180)K_x v} \quad (2.19)$$

また、式(2.18)において $s = j\omega$ において整理すると次式を得る。

$$G_{(j\omega)} = K \frac{\left(\frac{K_d}{v}\right)\omega^2 - (\pi/180)K_x v - j\omega K_p}{\omega^2(1 + j\omega T)} \quad (2.20)$$

さて、ここで式(2.5)、式(2.6)、式(2.7)に $T' = 0.9$ 、 $K' = 1.2$ 、 $L = 100, 150, 200, 280, 330$ を代入し、操船者制御定数を求めた。この計算結果を表 2.1 に示す。

表 2.1 操船者制御定数 (K'=1.2、T'=0.9)

L	100	150	200	280	330
K _x	0.07875	0.0525	0.039375	0.028125	0.023863636
K _p	0.525	0.525	0.525	0.525	0.525
K _d	0.654498	0.9817477	1.308997	1.832595715	2.159844949
K	0.07404	0.04936	0.03702	0.026442857	0.022436364
T	14.58671	21.880065	29.17342	40.84278768	48.13614263

次に表 2.1 で示した操船者制御定数を式(2.20)に代入して周波数特性を求めた。 $G_{(s)}$ の $s = j\omega$ ($0 < \omega < +\infty$) に対するベクトル軌跡を図 2.2 に示す。この図において、向かって右側の図は同左の図の一部を拡大したものである。

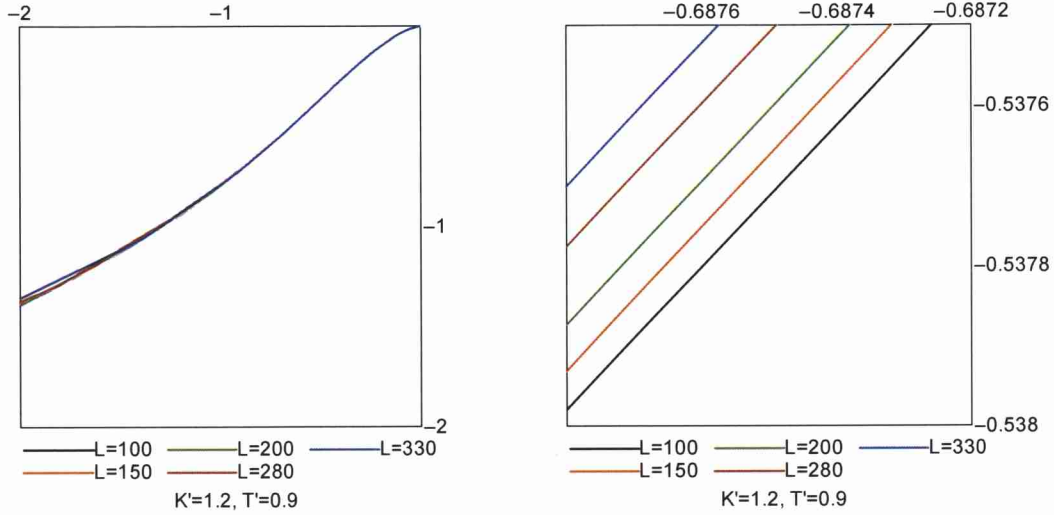


図 2.2 Nyquist 軌跡

図 2.2 において、 ω の増加の向きに各船種のベクトル軌跡をたどる時、点 $(-1, j0)$ を左側に見るので、全ての船種について系は安定となることが示された。また、図 2.2 の右側の図から L が増大すると位相余裕は微少であるが減少することが示される。

この理由を以下に示す。

いま、一巡伝達関数(2.18)に正規化操船者制御定数の式(2.5)、(2.6)、(2.7)を代入する。

$$\begin{aligned}
 G_{(s)} &= \frac{K}{s^2(Ts+1)} \left\{ \frac{K_d}{v} s^2 + K_p s + \frac{\pi}{180} K_x v \right\} \\
 &= \frac{K}{s^2(Ts+1)} \left\{ \frac{K_d}{v} s^2 + K_p s + \frac{\pi}{180} K_x v \right\} \\
 &= \frac{K}{s(Ts+1)} \left\{ \frac{K_d}{v} s + K_p + \frac{\pi}{180} K_x v \frac{1}{s} \right\} \\
 &= \frac{K}{s(Ts+1)} \left\{ H_\psi \frac{T'}{K'} \frac{L}{v} s + H_\psi \frac{T'}{K'} + \frac{\pi}{180} H_x \frac{T'}{K'} \frac{v}{L} \frac{1}{s} \right\} \\
 &= \frac{K}{s(Ts+1)} \frac{T'}{K'} \left\{ H_\psi + \frac{\pi}{180} H_x \frac{v}{L} \frac{1}{s} + H_\psi \frac{L}{v} s \right\} \\
 &= \frac{K}{s(Ts+1)} \frac{T'}{K'} H_\psi \left\{ 1 + \frac{\pi}{180} \frac{H_x}{H_\psi} \frac{v}{L} \frac{1}{s} + \frac{H_\psi}{H_\psi} \frac{L}{v} s \right\} \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

ここで、 $K = K' \frac{v}{L}$ であるので式(2.21)は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 G_{(s)} &= \frac{1}{s(Ts+1)} K' \frac{v}{L} \frac{T'}{K'} H_{\psi} \left\{ 1 + \frac{\pi}{180} \frac{H_x}{H_{\psi}} \frac{v}{L} \frac{1}{s} + \frac{H_{\dot{\psi}}}{H_{\psi}} \frac{L}{v} s \right\} \\
 &= \frac{T' \frac{v}{L}}{s(Ts+1)} H_{\psi} \left\{ 1 + \frac{\pi}{180} \frac{H_x}{H_{\psi}} \frac{v}{L} \frac{1}{s} + \frac{H_{\dot{\psi}}}{H_{\psi}} \frac{L}{v} s \right\} \\
 &= \frac{K_M}{s(Ts+1)} k_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right\} \quad (2.22)
 \end{aligned}$$

ただし、 K_M 、 T_I 、 T_D 、 k_p は次のようにおいた。

$$K_M = T' \frac{v}{L} \quad (2.23)$$

$$T_D = \frac{H_{\dot{\psi}}}{H_{\psi}} \frac{L}{v} \quad (2.24)$$

$$T_I = \frac{180}{\pi} \frac{H_{\psi}}{H_x} \frac{L}{v} \quad (2.25)$$

$$k_p = H_{\psi} \quad (2.26)$$

式(2.22)において $k_p \left\{ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right\}$ 項は PID 調節計を表す。すなわち、これは操船者が対象とする系において PID 調節計として振舞うことを意味する。この時の操船者の操舵による船体制御について概説する。

図 2.1 において制御器としての操船者に対する入力横偏位量である。操船者はまず、横偏位量に従った比例動作を行う。比例動作だけでは、横偏位量の除去が行えない。したがって、横偏位量を除去するために積分動作を行う。この時、積分動作の大きさによっては操船者の横偏位量入力に対する応答は遅くなる。したがって、このような制御応答を早くさせるために、微分動作を加える。操船者は結局、比例動作、積分動作、微分動作のバランスを取りながら船体制御していることになる。

式(2.23)において K_M は船体ゲイン定数を表し、 K' は操船者制御定数と相殺され、 T' と交換されたことがわかる。したがって、本研究で対象とする自動制御系において船体ゲイン定数は T' が船速に比例し、船長に反比例するように変化することがわかる。

式(2.24)の T_D は微分時間を表し、式(2.25)の T_I は積分時間を表す。さらに式(2.26)の k_p は PID 調節計の比例ゲインを表す。ここで、これらの PID パラメータを表 2.2 に示す。

表 2.2 PID パラメータ

L	100	150	200	280	330
T'	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
kp	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
TI	61.90792	92.86188	123.8158	173.3422	204.2961
TD	11.57675	17.36513	23.15351	32.41491	38.20329
KM	0.05553	0.03702	0.027765	0.019832	0.016827

また、表 2.2 で示した PID の各パラメータを図示したものが次の図 2.3 から図 2.5 である。

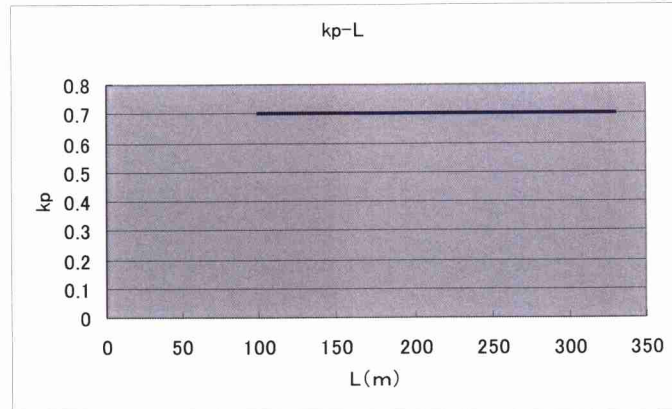


図 2.3 比例ゲインの L による変化

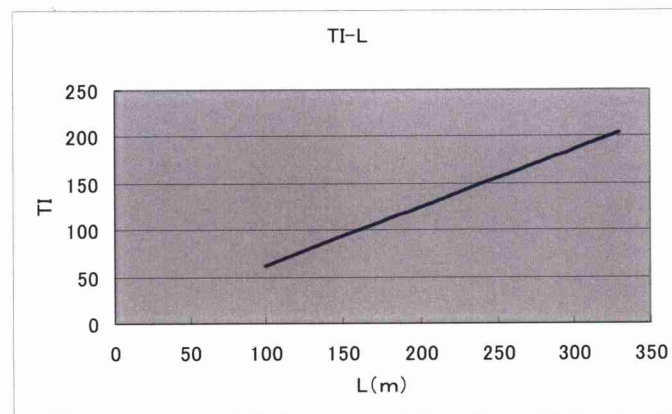


図 2.4 積分時間の L による変化

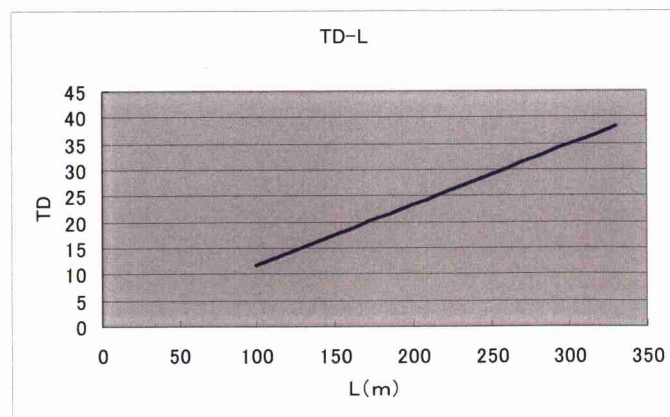


図 2.5 微分時間の L による変化

以上から以下が考えられる。

- k_p : 比例動作の大きさは L の大小によらず一定であるが、このケースの場合 H_ψ は 0.7 であるため、比例ゲインが過大であることが考えられる。したがって、過大な比例ゲインによって系の安定性は悪くなり、位相余裕は減少する傾向にある。

- ・ T_I : 積分時間は L に比例して増大しているため、積分動作は L の増大に反比例して減少する。このため、積分動作の減少に伴い位相余裕は増大する傾向にある。
- ・ T_D : 微分時間は L に比例して増大する。このため、微分動作は増大し、比例動作が過大であることからもたらされる振動を減衰させる。そして、位相余裕は増大する傾向にある。
- ・ K_M : 船体ゲイン定数は L の増加に反比例して減少する。したがって、系の位相余裕は L の増加に伴い、増大する傾向にある。

これらが互いに相殺した結果、同一の T' 、 K' の場合、全ての L の船において Nyquist 軌跡はほとんど、同一の軌跡となるが、 L の増加に伴って位相余裕は微減すると考えられる。

2.2.3. 操舵による船体運動の応答特性

次に表 2.1 で示した制御係数を使った数値シミュレーション結果から航跡の時系列変化を図 2.6 から図 2.10 に示す。航跡の時系列変化は操舵による船体の応答特性を最もよくあらわすものと考えることができる。したがって、以後の議論において航跡の時系列変化を利用して船体の操舵による操舵による船体の応答特性を調べることにする。

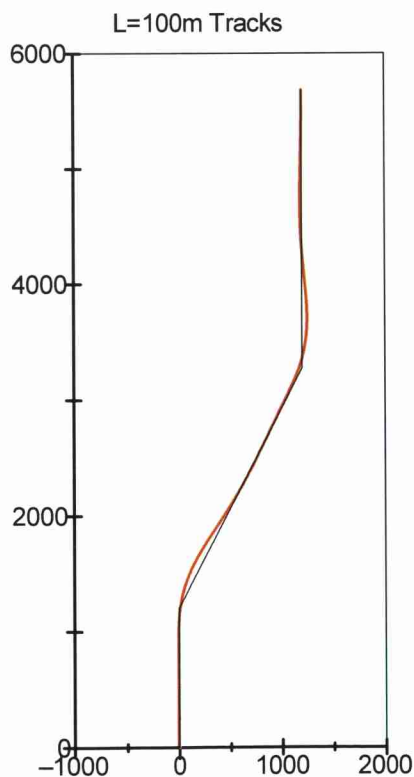


図 2.6 L=100m

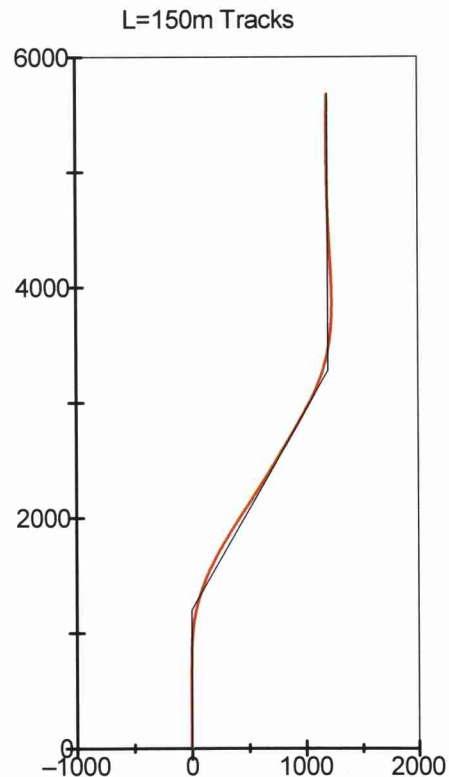


図 2.7 L=150m

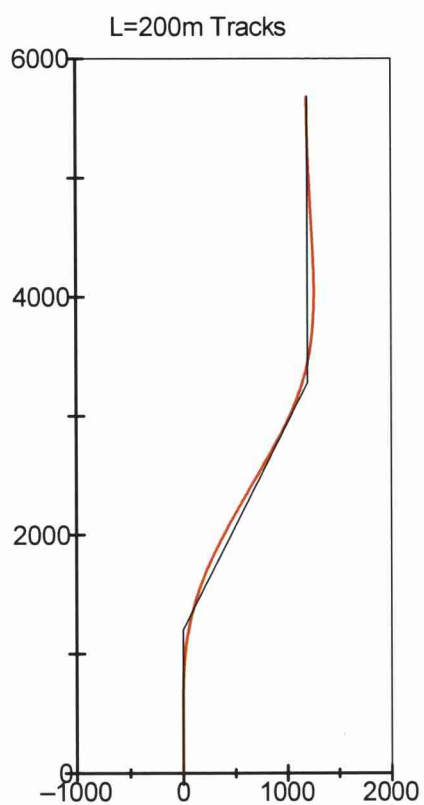


図 2.8 L=200m

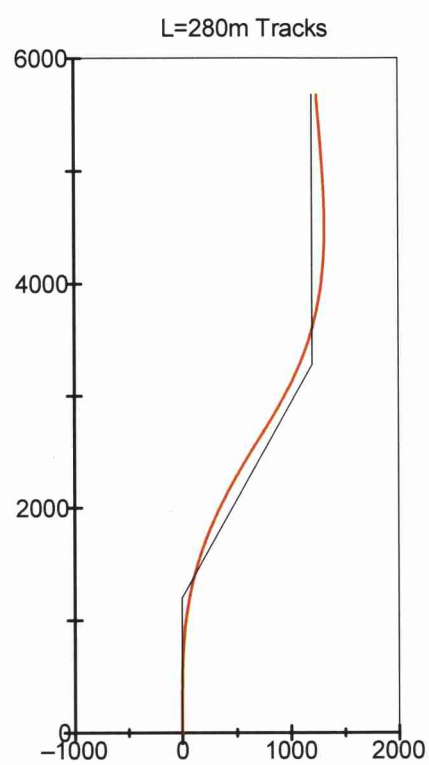


図 2.9 L=280m

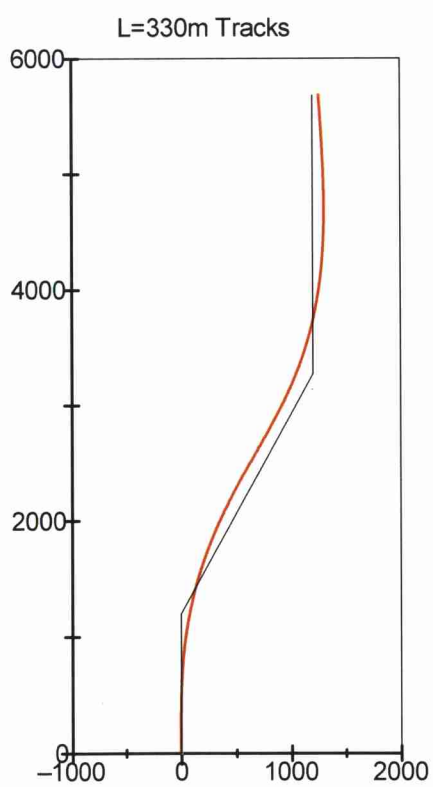


図 2.10 L=330m

これらの図から以下がわかる。

- ・ $L=100\text{m}$ においても航跡の時系列変化は、減衰振動ではあるがハンチングが認められる。
- ・ この減少は L が増大するのに伴い、より顕著になっている。
- ・ 特に $L=280\text{m}$ 、 330m においてはオーバーシュートが顕著になっている。
- ・ 全ての L について制御応答は速いことが、第 1 航路から第 2 航路への変針箇所を確認できる。

したがって、前節で考察した結果が確認できる。すなわち、PID 調節計の比例ゲインが過大であるため、操舵による船体の応答はこれらの図で示したように振動形を示す。

さらに、積分時間が L の増大に連れて増加しているため、積分動作は減少していることがこれらの図における横偏位量の増加から読み取れる。同時に積分動作の減少と微分時間の増加に伴う微分動作の増加により、船体の操舵による船体の応答は速くなっている。

そして、これらを総合すると、全ての L について操舵による船体の応答はハンチングが認められるものの減衰振動の範囲であり、これ故、系の安定性は損なわれてはいないことが確認できる。

以上の考察から、式(2.5)、(2.6)、(2.7)で導入された正規化操船者制御定数による船体制御では、 L の大小に係わらず全ての制御対象の船体に対し、一定の位相余裕による系の安定性を確保する。それと同時に、操舵による船体の応答を減衰振動形、つまり、行き過ぎ量を許す船体制御により舵追従性の悪い船に対して横偏位量の発生を抑える特性がある。

T' が大きい船は、舵追従性が悪い。したがって、本研究で扱う操船者特性では式(2.23)で示したように船体ゲイン定数 K_M は T' の増大に伴って増加する。したがって、対象とする系のゲインが増加することになるので、横偏位量の発生は抑制することができる。また、それと同時に位相余裕は減少し、不安定領域に近づくことになる。

ここで、 T' を増大させた時の Nyquist 軌跡と操舵による船体の応答を図 2.11 および図 2.12 に示す。ただし、 $L=100\text{m}$ と 280m を抜粋して示す。

これらの図から、 T' が増加すると船体ゲイン定数も増加するが、位相余裕は減少していることが明らかとなる。また、操舵による船体の応答では減衰振動を示し、 T' の増加に伴って行き過ぎ量、横偏位量も抑制が効いていることが示された。

一般に自動制御系においてゲインが増加すると位相余裕は減少し、系の安定性は不安定領域に近づくことになるが、残留偏差は減少する。したがって、ここで対象とした系についても一般的な自動制御系と同様の結果が示されたことになる。

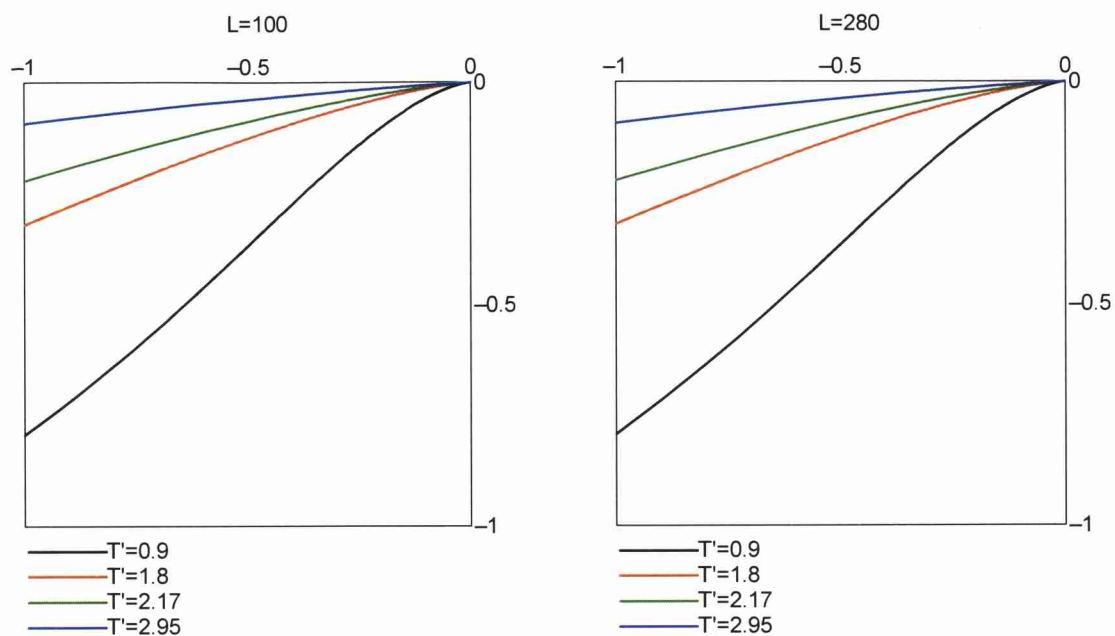


図 2.11 船体ゲイン定数の増加に伴う位相余裕の変化

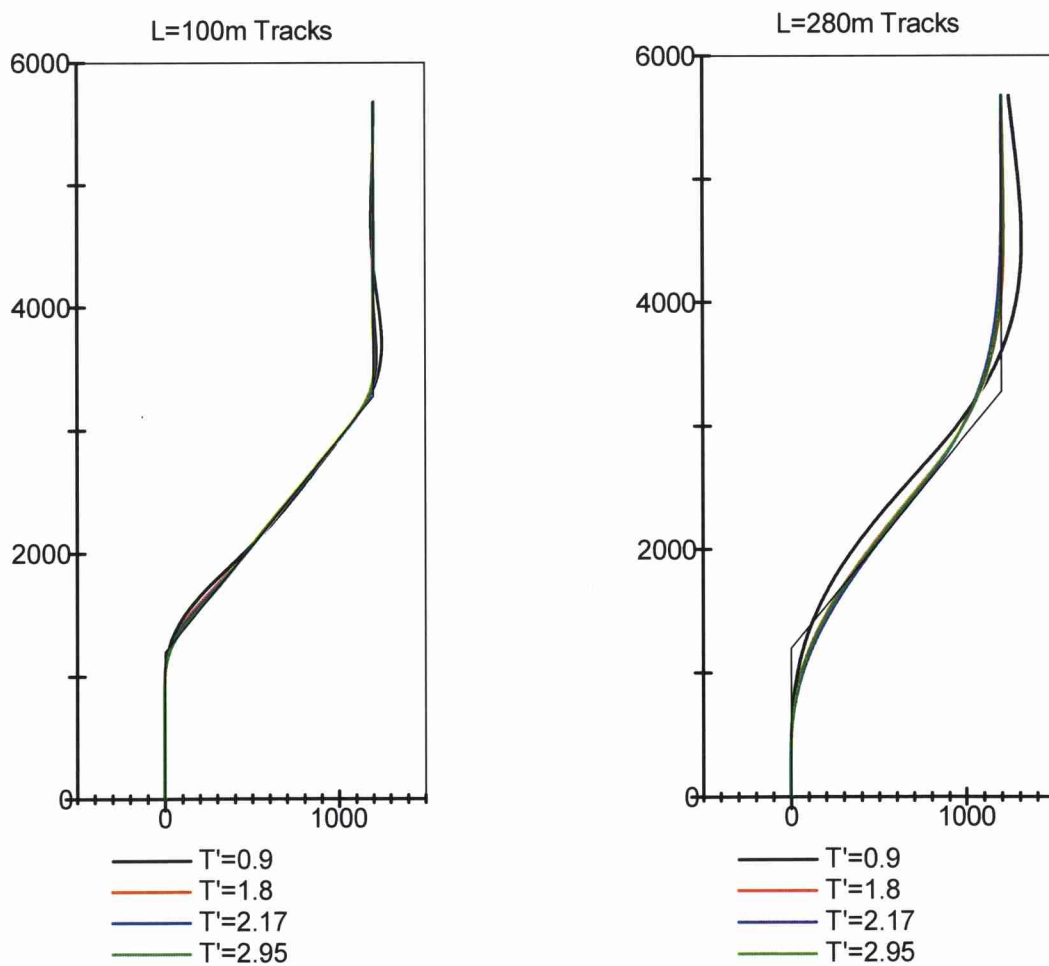


図 2.12 船体ゲイン定数の変化に伴う操舵による船体の応答

2.2.4. 適応制御特性

適応制御は従来の PID 制御では制御対象の特性変動に対応できず制御性能が低下することを回避するために、制御器の制御特性を制御対象の特性変動に適応させることでより良好な制御性能を得ようとするものである。

操船システムの場合、操船者が自動制御システムにおける制御器の役割を担うこととなる。そして、操船者は制御対象の船の種類が異なっても適切に船体制御を行っていることは周知の事実である。すなわち、操船者には適応制御特性があると考えられている。ここでは、船体制御特性の変化を船長によるものとし、操船者の適応制御特性を明らかにする。

先に求めた正規化制御定数から、船長 $L=100$ の操船者制御定数を $L=150, 200, 280, 330$ の各船種に当てはめた際の数値シミュレーション結果を Nyquist 軌跡と操舵による船体の応答の変化として図 2.13 に示す。

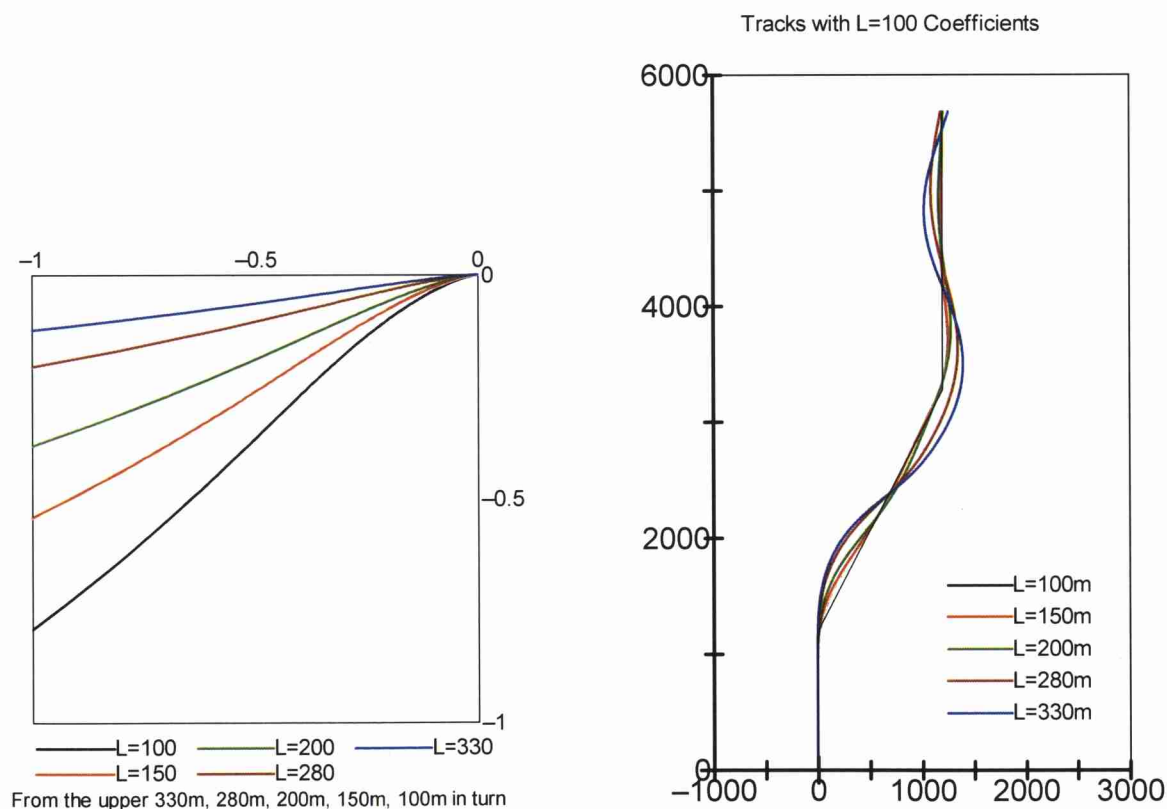


図 2.13 $L=100$ の制御係数による各船種の Nyquist 軌跡(左)と

操舵による船体の応答の変化(右)

図からも示されるとおり、位相余裕は船長の増加に伴い減少している。また、操舵による船体の応答は船長が増加すると振動が大きくなることがわかる。特に $L=280m$ 以上では位相余裕は不安定領域に近づくとともに操舵による船体の応答は大きく持続振動していることが示される。

これは、船長 L に対応した制御係数よりも K_x は大きく、 K_d は小さくなっていること

が理由である。 K_x の増加は位相余有の減少と操舵による船体の応答の持続振動を、そして、 K_d の減少は位相余有の減少と操舵による船体の応答の振動抑制の減少を意味している。これらは図 2.13 から明らかである。

これより、 $L=100\text{m}$ の制御係数を他の船に当てはめた状態では、操舵による船体の応答は持続振動を示し、さらに系の安定性も低下することが示される。

これに対して、図 2.2 および図 2.6 に示したとおり、また、前節で明らかにしたように各船種に対応した制御係数では操舵による船体の応答は振動形を示すものの減衰振動であり、系の安定性も全ての船に対して同一であることが示されている。

つまり、コントローラとしての操船者は操船者制御特性を制御対象の特性変動に適応させて船体制御を行っていることがわかる。すなわち、操船者特性には適応制御特性があることが示された。

ここで、操船者の適応制御特性の意味について考察する。今回のシミュレーションでは操船者制御係数を固定させ、異なる船長の船に適応させてその制御特性を調べたものである。その結果、異なる L の船に対する制御結果は持続振動をもたらしたことで制御は失敗したことが示された。このことは、それぞれの船に固有の操船者制御係数は制御対象の制御特性に合致したものであるとすることができる。操船者制御係数は操船者の制御特性であるため、これは換言すると、操船者は少なくとも制御対象の船長 L の変化に適応した制御を行っていることになる。

制御対象たる船の制御特性を変動させる特徴量は船長 L の他、船型、船幅、等、考えられるが、操縦性指数 T' 、 K' と K 、 T の関係を考慮すると、制御対象たる船の操縦性能を推定する上で船長 L は最も重要な要因であることがわかる。

2.3. 操船者支援のための方策

前章までで、操船者の制御特性は操舵による船体の応答を減衰振動させるとともに、船長の相違に係わらず位相余有をほぼ、一定とさせることがわかった。さらに、制御対象の船の船長が大きくなると設定航路線への追従は減衰振動におけるオーバーシュート量が増大することが操船者の一般的傾向として示された。また、本研究で対象としたシステムにおいて T が増大すると船体ゲイン定数も増加し、減衰振動が減少するとともに設定航路線に対するオーバーシュート量は減少することがわかった。

また、操船者は制御対象の船の船長の変化に自身の制御特性を変化させることで対応していることが示された。

本節では、前節で明らかとされた操船者の適応制御特性を利用した操船支援のための方策を検討する。適応制御特性を利用した操船支援は操船者の本来有する特性であり、この特性を引き出すことにより適切な支援ができる。

前節では船長 L から操船者は制御対象の制御特性を推定して船体の制御を行っていることが示された。本節では、この適応制御特性を利用した操船者支援のための方策を検討する。

2.3.1. 適応制御特性を利用した操船者支援

操船支援の目的は必ずしも熟練者ばかりではない操船者にとっても、容易に利用できるとともに、確実に操船結果の向上が図れることである。そのため、操船者に船体の制御特性を操船中においても正しく推定させることを考えた。

操船者の適応制御特性は制御対象の特徴量をもとに船体の制御特性を推測しており、異なる船長 L の船に対しても操船者は船体の制御特性を推定していると考えることができる。しかし、操船者は必ずしも船体の制御特性を確実に推定することはできないと同時に、操船者個人の知識・経験の程度の相違、あるいは、もっと個人的な操船の癖などによって、制御特性を推定する上で差異が発生することは避けられないことである。

したがって、操船者個人による操船の個人差を平準化すること、つまり、操船者の制御特性の個人差による変動を適応制御特性によって平準化することが必要である。

ここで、一次系船体運動方程式(2.2)について評価関数(2.1)を最小とする最適レギュレータ問題を解いて得られた最適制御モデルにおける状態変数に係わる制御定数は、式(2.1)の最適レギュレータのフィードバック・ゲインとして求められたものである。そして、操船者制御定数は航路航行操船における操船者の制御特性をこの最適制御モデルに当てはめて求めたものである。

したがって、航路航行操船における操船者制御モデルにおいて状態変数を正しく把握することにより、フィードバック・ゲインとしての操船者制御定数の個人差による差異を低減することで、適応制御特性によって操船者が船長 L から船体制御特性を推定する際の精度が向上できると考えた。

状態変数としては、回頭角速度、船首方位偏角、横偏位量を対象とする。これらは操船者の船体制御による結果として船体運動によりフィードバックされる状態変数であ

る。操船者は状態変数を確認しながら操船している。

これらの状態変数のうち、船首方位偏角は現在の船体の動きを表しており、回頭角速度は現在行った制御による船体の未来の動きを表す。また、横偏位量は過去の船体制御の結果を表す。そして、操船者制御モデルによって、船首方位偏角は比例要素の入力を、回頭角速度は微分要素の入力を、そして、横偏位量は積分要素の入力を表す。

2.3.2. 状態変数表示の操船者特性に与える影響

状態変数を表示することで操船者の支援を行うことを検討したが、ここではまず、操船者特性の制御的意味について明らかとする。

操船者制御係数は航路航行操船において船体制御に対する以下に示す効用がある。

(ア) 船首方位偏角制御係数 K_p

K_p は船首方位が設定針路に対して偏差が生じた時、すなわち、船首方位偏角が発生した時にその偏角を修正する比例動作における制御係数である。したがって、 K_p が小さい時には船体の舵操作における応答は針路の修正動作が小さいことから設定針路に達しないことになる。反対に K_p が大きい時には針路の修正動作が大きいために設定針路を超過し、設定針路より行き過ぎることになる。また、 K_p が適切な値の時はちょうど設定針路に整定することになる。つまり、 K_p は設定針路に対する操舵による船体の応答の形状を直接決定する制御係数となる。

(イ) 横偏位量制御係数 K_x

K_x は船体位置が設定針路に対して偏位した時、すなわち、横偏位量が発生した時に設定針路に対する偏位を修正する積分動作における制御係数である。したがって、 K_x が小さい時には横偏位の修正動作が小さくなり、設定針路に達しない。また、 K_x が大きい時には横偏位の修正動作が大きくなり、設定針路を超過する。そして、この際の横偏位に対して引き続き、同様な修正動作を行うため、操舵による船体の応答は振動することになる。つまり、 K_x は操舵による船体の応答の振動を支配する制御係数となる。

(ウ) 回頭角速度制御係数 K_d

K_d は船体が操船者の制御によって運動する際に発生する回頭角速度を減衰させる動作に関わる制御係数である。したがって、 K_d が小さい時には回頭角速度の減衰動作が小さくなるためその時点における船体運動の抑制は小さくなる。また、 K_d が大きい時には減衰動作は大きくなるため、その時点における船体運動の抑制は大きくなる。また、このような制御動作から、船体運動の速応性に関する制御係数でもある。つまり、 K_d は操舵による船体の応答の振動を減衰させる制御係数となる。

操船者モデルでは、航路航行操船の場合、上に記した制御動作を組み合わせることで船体制御を行っていることになる。

次に状態変数表示の有無が操船者特性にどのような影響を与えるかを調べることに

する。このため、現状の操船システムにおいて操船者特性に直接関係のある回頭角速度計の表示の有無が操船者特性にどのような影響があるかを調べた。

表 2.3 と図 2.14 に回頭角速度表示を行った場合とそうでない場合の操船シミュレータによる平行移動操船実験結果から求めた操船者特性係数を示す。さらに、Nyquist 軌跡を図 2.15 に示す。なお、図中、NTRI は回頭角速度計なしを、TRI は同ありを示す。(以下、同様)

表 2.3 操船者制御係数比較 (左：回頭角速度計なし、右：回頭角速度計あり)

Non Turn Rate Indicator					
	100	150	200	280	330
K_x	0.070062	0.081112	0.081258	0.095343	0.107204
K_p	0.571123	0.840534	1.294793	1.670696	1.75607
K_d	1.017242	2.71454	3.759877	5.989345	9.404029
K	0.07404	0.065813	0.04936	0.023138	0.017388
T	14.58671	71.71799	95.62399	81.68558	116.0616
K'	1.2	1.6	1.6	1.05	0.93
T'	0.9	2.95	2.95	1.8	2.17

Turn Rate Indicator					
	100	150	200	280	330
K_x	0.092127	0.105289	0.081172	0.075674	0.080601
K_p	0.661421	0.824508	0.969743	1.314916	1.59632
K_d	0.821136	2.426034	3.300261	4.335949	7.236202
K	0.07404	0.065813	0.04936	0.023138	0.017388
T	14.58671	71.71799	95.62399	81.68558	116.0616
K'	1.2	1.6	1.6	1.05	0.93
T'	0.9	2.95	2.95	1.8	2.17

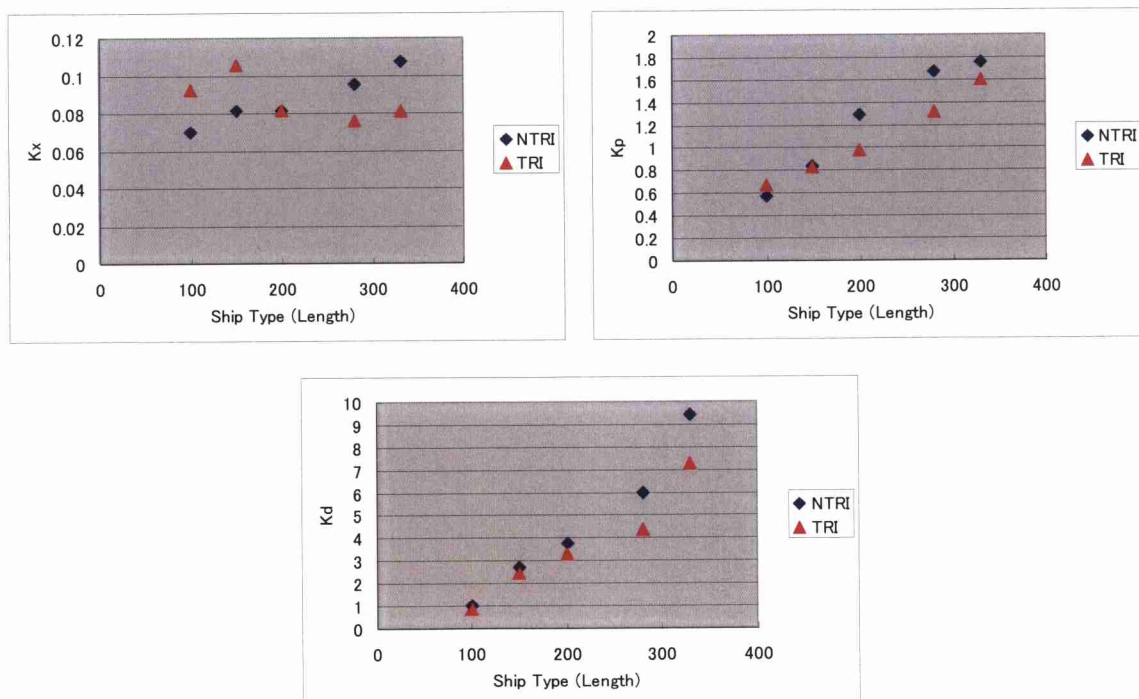


図 2.14 操船者制御係数比較

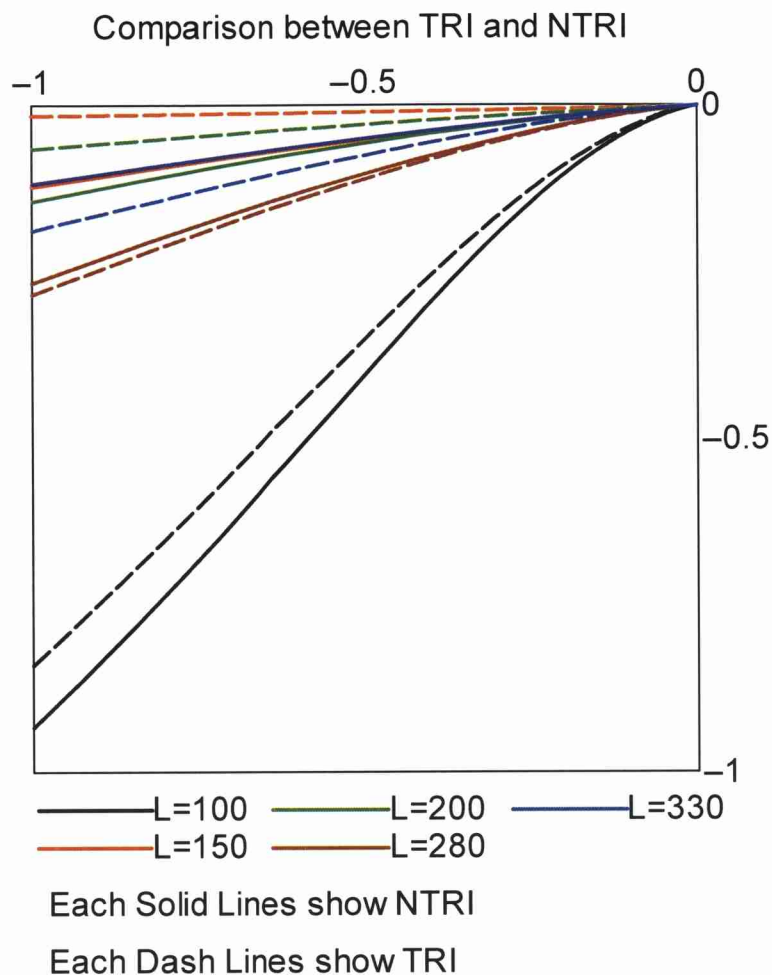


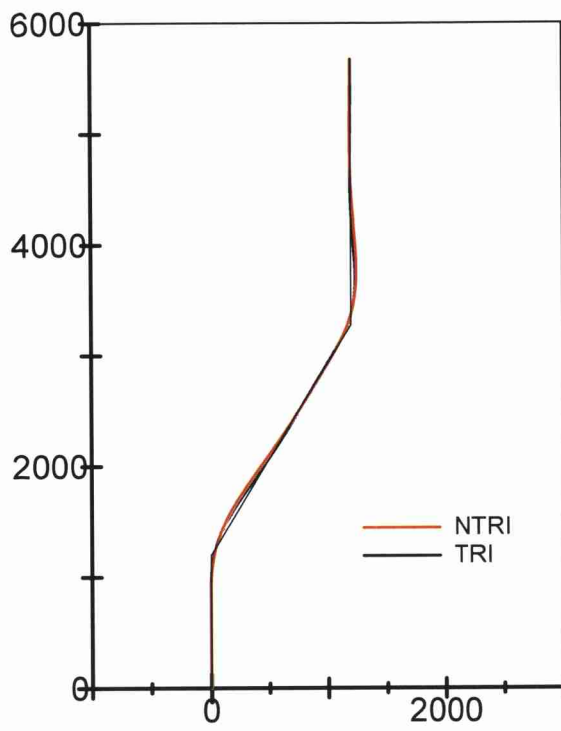
図 2.15 Nyquist 軌跡比較

回頭角速度表示を行わなかった場合（NTRI）は表示を行った場合（TRI）と比較して以下のような相違が示された。

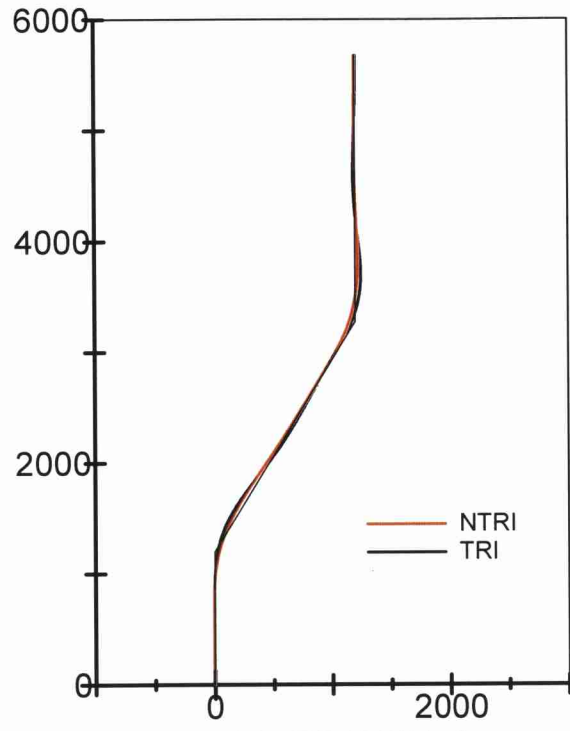
- （１）横偏位量係数 K_x は船長 200m を境に 200m 未満では減少し、200m を超える船では増加した。また、船長 200m の船ではほぼ等しい。
- （２）船首方位偏角係数 K_p は船長 150m ではほぼ等しく、100m では減少している。また、船長 200m 以上では増大した。
- （３）回頭角速度係数 K_d は全ての船種について増加した。この時、船長 330m では特に増加傾向が大きいことが認められる。
- （４）船長 100m、150m、200m では位相余裕は増大し、船長 280m、330m では減少している。

次にこの実験で求められた制御係数によって航路航行シミュレーションを行った。その結果を航跡の時系列変化として図 2.16 に示す。

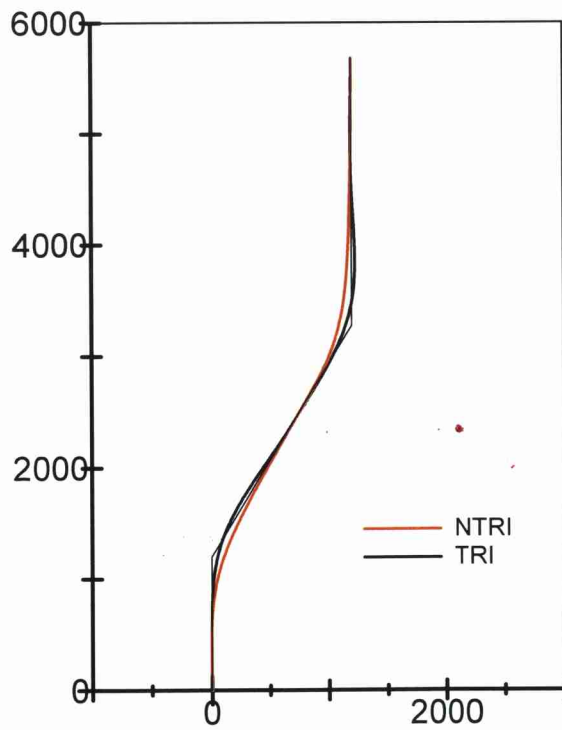
L=100m TRI-NTRI Tracks



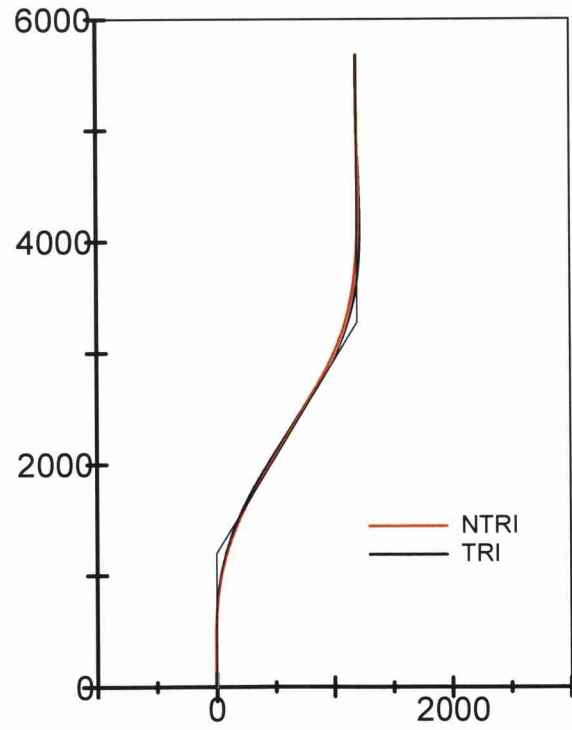
L=150m TRI-NTRI Tracks



L=200m TRI-NTRI Tracks



L=280m TRI-NTRI Tracks



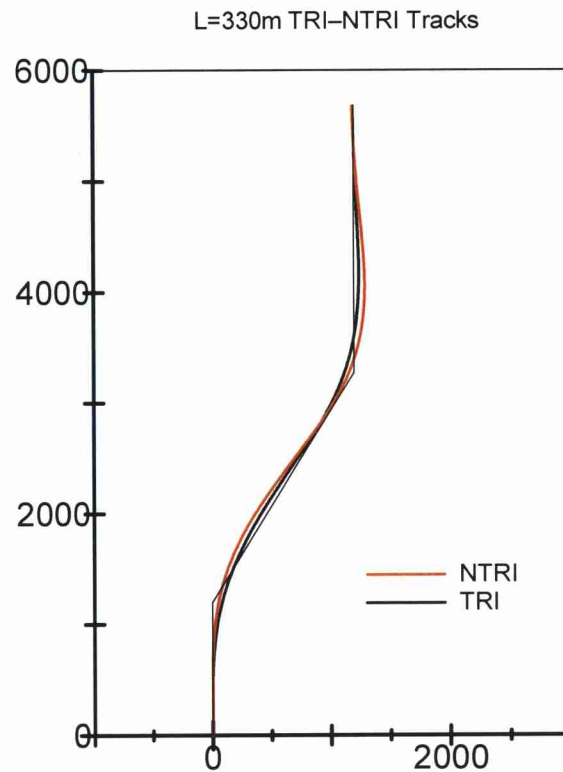


図 2.16 回頭角速度表示有無による時系列航跡変化

数値シミュレーション結果は操船者制御係数の変化を裏付けるものとなっている。

すなわち、船長 100m の船の場合、NTRI では K_x は減少、 K_p が微減し、 K_d が微増している。(以下、各船長の船の場合において TRI を基準とし NTRI の時の変化について述べることにする。) 操舵による船体の応答は TRI の場合と変わらずオーバーシュート形であるが横偏位量は大きくなっている。また、位相余有も TRI の時より増大している。この時、 K_x の減少分は K_d 、 K_p の増減分に比して大きい。このため、 K_x の減少による効果によって、横偏位量は増大するとともに位相余有も増大する。

また、船長 150m の船では K_x が減少、 K_p 、 K_d は微増している。操舵による船体の応答はオーバーシュート形であるが、横偏位量は増加しており、位相余有も増大している。この時も船長 100m の船の場合と同様に K_x の減少効果によって横偏位量は増大し、位相余有も増大する。

船長 200m の船では K_x は微増し、 K_p 、 K_d は増大している。操舵による船体の応答はアンダーシュート形となり、位相余有も増大している。ここでは、PID 制御のバランスから考慮すると、 K_p 、 K_d は増加しているものの、これら二つの制御係数の増分に見合うだけ K_x は増加しておらず、見掛け上、 K_x は減少していることになる。従って、このような K_x の減少効果によって横偏位量の発生は増大し、操舵による船体の応答はアンダーシュート形を示すことになる。同時に同様の理由によって、位相余有についても増大することになる。

次に、船長 280m の船では K_x 、 K_p 、 K_d とともに増大している。また、操舵による船体の応答は TRI も NTRI もほとんど変わらず、横偏位量についても変わらない。また、位相余有に若干の減少は認められるものの位相余有の減少に有意な差は認められない。こ

の時、各制御係数の増大はゲインを増大させるのと同じ効果を有する。このため、操舵による船体の応答は K_p の増大効果による振動が K_d の増大による効果によって抑制されてオーバーシュート形となり、 K_x の増大によって横偏位量の発生も抑制され、位相余有は減少するが、その差は僅少となる。

最後に、船長 330m の船では K_x 、 K_p 、 K_d ともに増大している。操舵による船体の応答は TRI の時より振動が大きく、横偏位量も大きくなっている。また、位相余有は安定領域にあるものの減少している。この時、 K_x 、 K_p 、 K_d の各制御係数は増大しているにも拘らず、操舵による船体の応答は振動形を示すとともにオーバーシュート量も大きくなっている。操舵による船体の応答が振動形を示すのは K_p の増大による影響である。NTRI 時の K_p は他の二つの制御係数の増分より増加の程度は小さいにも拘らず操舵による船体の応答が振動形を示すのは、 K_p 増大によって生じる振動を K_d 、 K_x の増大によっても十分に抑制できていないことを表している。つまり、TRI 時における各制御係数の値がこの時の系の限界値であり、 K_p を TRI 時の値よりも増大させることは系の制御バランスを乱すことになると考えられる。すなわち、NTRI では特に K_p における PID 制御の限界値を超過しているため、良好な制御とは言えない。

ここで、回頭角速度、船首方位偏角、横偏位量に対応する各制御係数の変化について考察する。

回頭角速度係数 K_d の増大は、発生した回頭角速度に対する修正動作を大きくすることであり、位相余有を増大させ、操舵による船体の応答の振動を抑制することである。

また、横偏位量係数 K_x の減少は、発生した横偏位量に対する修正動作が小さいことである。制御的には位相余有を増大させ、操舵による船体の応答をアンダーシュート形とすることである。一方、 K_x の増大は、発生した横偏位量に対する修正動作が大きいことである。制御的には位相余有を減少させ、操舵による船体の応答をオーバーシュート形とすることである。

次に、船首方位偏角係数 K_p の増大は、発生した船首方位偏角に対する修正動作が大きいことである。制御的には位相余有を減少させ、操舵による船体の応答は振動形とすることである。一方、 K_p の減少は発生した船首方位偏角に対する修正動作が小さいことである。制御的には位相余有を増大させ、操舵による船体の応答をアンダーシュート形とすることである。

以上をまとめると、回頭角速度表示がない場合の操船者の制御には次のような特徴があることがわかった。

操船者は既に述べたように制御対象の船の船長 L をもとに操縦性能を推定しており、その推定した操縦性能を元に実際の船体制御からのフィードバックである状態変数を確認しながら操船している。この時、操船者は各状態変数の値を元に推定した操縦性能を実際の操縦性能に適応させるように船体制御することになる。回頭角速度計がないことは、これら状態変数のうちで船体運動を表す回頭角速度の確認が正確には行えないことを意味している。船体制御においては操舵による回頭運動の制御が重要であり、回頭運動を表す回頭角速度の発生、発達、減衰、終息を逐一、表示する回頭角速度計がないことは操船者が船長 L から推定した操縦性能を操船時にフィードバックされた状態変数から修正することができなくなるということになる。つまり、操船者の適応制御特性が

悪くなるということとなる。実際、今回の実験において操船者は回頭角速度の把握を船首方位の変化によって行っていた。回頭角速度は操舵を行うと実際の回頭運動が確認できる前に直ちに発生する。通常、操船者は回頭角速度の発生を回頭角速度計によって発生と同時に確認することができる。回頭角速度の終息も同様である。この間の回頭角速度の発達と減衰については回頭角速度計と同時に船首方位の変化によって確認している。したがって、回頭角速度計がない場合、操船者の船体運動把握の方法は、船首方位の変化のみとなる。このため、追従性指数が小さい場合には時定数が小さいため操舵を行ってから船体の回頭運動を把握できるまでの時間は短いものとなるが、追従性指数が大きい場合には時定数が大きいため操舵から船体の回頭運動の把握までの時間は長くなる。また、旋回性指数が大きい場合には操舵してから船体の回頭運動はその初期の段階から顕著に把握できるが、旋回性指数が小さい場合には船体の回頭運動が顕著に把握できるようになるのは回頭各速度が十分に発達してからとなる。

さて、船長 100m、150m の船では横偏位量の抑制が若干ではあるが、小さくなっている。このような小型船の場合、一般に追従性および旋回性は良好、つまり、追従性指数は小さく、旋回性指数は大きい。小型船において、操船者の操舵による船体の回頭運動の把握は操舵から間をおかずに行うことが可能である。このため、回頭角速度計がない場合、操舵してから後追いでも船体制御を行うことができる。しかし、回頭角速度の発生、終息の判断は回頭角速度計がある場合に比べて遅れがちとなる。特に、回頭角速度の終息は回頭が定速運動に入ったことを表す、もしくは、回頭運動の終焉を表しているため、特に回頭角速度の終息が正確に把握できないことは設定針路からの横偏位量が増大することとなる。

これを操船者の適応制御特性の観点から述べると、操船者はまず、船長 100m と 150m の操縦性能の良好な船の操縦性能を推定することになる。そして、この推定に基づいて操舵を行い、その結果をフィードバックされた状態変数として船首方位の変化から船体運動、つまり、回頭角速度を確認する。この時、推定した操縦性能と実際の制御結果との差異を把握しながら、操船者特性を適応させることでこの差異を吸収することになる。回頭角速度計がない場合にはこの操船者特性の適応制御特性が十分に行われなくなることになる。

一方、船長 200m 以上の船では船首方位偏角（比例制御）、横偏位量（積分制御）、回頭角速度（微分制御）の抑制が大きくなっている。船長 200m 以上の大型船では旋回性、追従性も小型船に比べると劣る。このため、大型船においては船体の回頭運動における回頭角速度の発生と発達および減衰と終息の確認は特に重要となる。一般に大型船では回頭しづらく、また、設定針路への追従にも時間がかかるが、船体質量が大きいため、一旦、回頭を始めた場合の慣性力が大きくなる。従って、この慣性力を制御することが大型船の場合の制御の目的ともなる。これ故、回頭角速度の発生と発達、減衰と終息を早期に確認することが、大型船の船体制御を行う上で必要不可欠となってくる。

さて、回頭角速度計がない場合、大型船において操船者は十分に回頭角速度が発達してから操舵による船体の回頭運動の把握が可能となる。この時、船体運動（回頭運動）の確認は主に船首方位偏角によって行うことになる。このため、操船の失敗を防ぐために船首方位偏角が発生した時点で操船者は操舵を行うことになる。これは、換言すれば、

操船者は回頭角速度計がない場合、船首方位偏角に基づいて船体制御を行っているということになる。

この時、操船者は船体の船長 L から操縦性能を推定し、この推定に基づき船体制御を行う。操舵のフィードバックとして主に船首方位偏角に操船者特性を適応させる。従って、 K_p が増大するとともに操舵による船体応答が振動的になることを抑制するために K_d , K_x もそれぞれ増大させるように操船者特性を適応させているものと考えられる。

つまり、回頭角速度計がない場合、小型船 ($L=150\text{m}$ 以下) と大型船 ($L=200\text{m}$ 以上) のどちらの場合においても、船体運動を表す回頭角速度の把握が正確に行えないことから操船者特性の適応制御が良好に行われなことが明らかとなった。特に大型船の場合に回頭角速度計がない場合の影響が顕著であることがわかった。換言すれば、船体制御のフィードバックである状態変数として回頭角速度を操船者に効果的に提示することが操船者特性の適応制御能力を向上させることになり、特に大型船において良好な操船結果を得ることができるものと考えられる。

2.3.3. 状態変数表示による操船者特性改善

前節では、状態変数の一つである回頭角速度を表示することで操船者の適応制御特性が向上できることが示された。本節では、このような操船者の適応制御能力をさらに高めるために状態変数を正確かつわかりやすく表示することで良好な操船結果を得るための考察を行う。

大型船に対して操船者は 2.2 節で示したように操舵による船体の応答をオーバーシュート形として設定航路を追従していた。一般に制御システムのステップ応答はアンダーシュート形の応答よりオーバーシュートさせた方が残留偏差の最小二乗面積は小さくなる。また、オーバーシュート形の応答においても、オーバーシュート量を最小にすることが横偏位量の発生が最小となる。

したがって、本研究で対象とするシステムにおいても大型船の操舵による船体の応答をオーバーシュート形としながら発生したオーバーシュート量を最小とすることで、横偏位量の最小二乗面積を小さくすることができると考えた。つまり、制御結果を良好とするために操舵による船体の応答を減衰振動形とするように操船者特性を改善することを考える。

ここで、操舵による船体の応答を減衰振動形とすることは、オーバーシュート量を許容しながら設定航路に追従し、しかも、発生したオーバーシュート量を減少させることである。したがって、操船者特性制御係数は次のように変更すればよいことがわかる。

- ・ オーバーシュート量の減少：横偏位量制御係数 K_x を増大させる。
- ・ 減衰振動：回頭角速度制御係数 K_d を増大させる。

ここでの考察内容をもとに船長 100m、280m の船に対して正規化した操船者制御係数 K_x , K_d を次に示すように変更して Nyquist 線図および操舵による船体の応答を調べた。船長 100m の制御係数を表 2.4 に、船長 280m の制御係数を表 2.5 に示す。

なお、 K_p について正規化した操船者特性において K_p は一定であったことから、改善の対象とはしない。さらに、前節で示したように回頭角速度を表示しないことは回頭角

速度制御係数を含めた全ての制御係数に影響を与えたことから、状態変数の表示は関連する制御係数以外の制御係数についても影響を及ぼすことが類推できる。

表 2.4 船長 100m

	Kx	Kp	Kd
Original	0.07875	0.525	0.6545
Case1	0.082688	0.525	0.687225
Case2	0.086625	0.525	0.71995
Case3	0.090563	0.525	0.752675
Case4	0.0945	0.525	0.7854
Case5	0.098438	0.525	0.818125

表 2.5 船長 280m

	Kx	Kp	Kd
Original	0.064286	1.2	4.18879
Case1	0.0675	1.2	4.39823
Case2	0.070715	1.2	4.607669
Case3	0.073929	1.2	4.817109
Case4	0.077143	1.2	5.026548
Case5	0.080358	1.2	5.235988

表 2.4 および表 2.5 において Case1～Case5 は、以下のように設定した。

- ・ Case1 Kp は正規化された制御係数、Kx、Kd はもとの正規化した係数を 5% 増加
- ・ Case2 Kp は正規化された制御係数、Kx、Kd はもとの正規化した係数を 10% 増加
- ・ Case3 Kp は正規化された制御係数、Kx、Kd はもとの正規化した係数を 15% 増加
- ・ Case4 Kp は正規化された制御係数、Kx、Kd はもとの正規化した係数を 20% 増加
- ・ Case5 Kp は正規化された制御係数、Kx、Kd はもとの正規化した係数を 25% 増加

船長 100m の各ケースの制御係数に対応した Nyquist 線図と操舵による船体の応答を図 2.17 に示す。

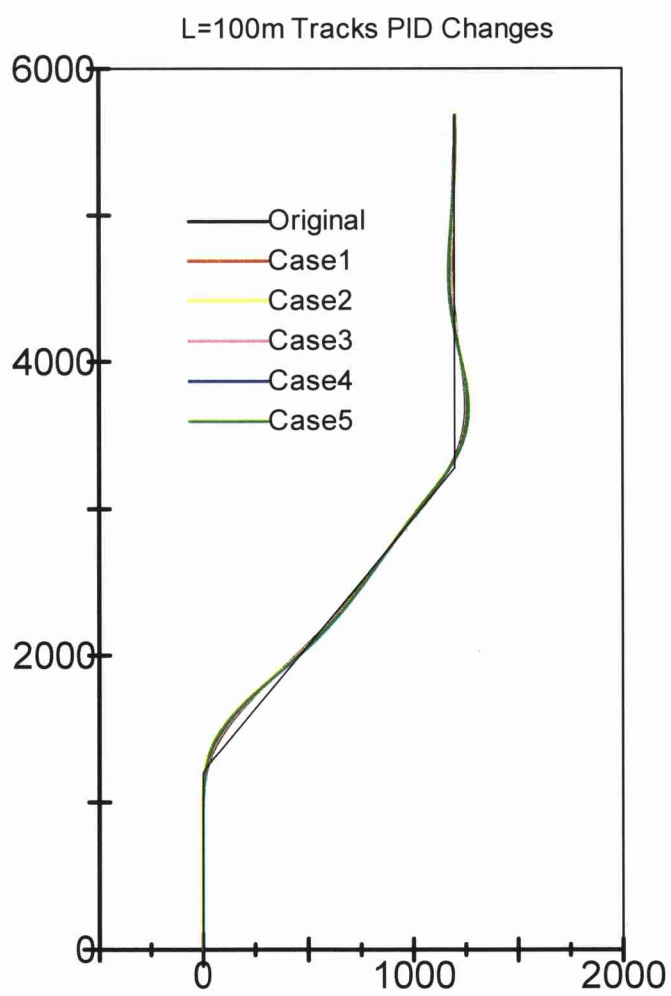
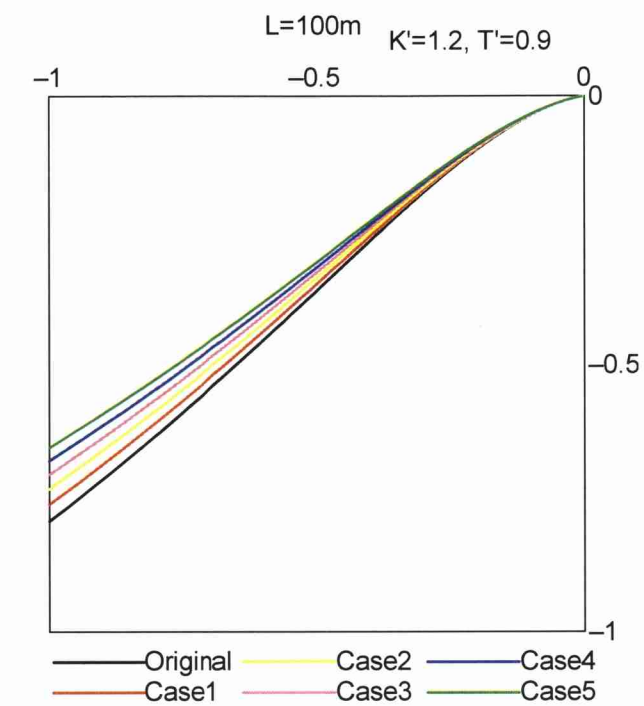


図 2.17 船長 100m 操船者特性改善

同様に船長 280m の各ケースの制御係数に対応した Nyquist 線図と操舵による船体の応答を図 2.18 に示す。

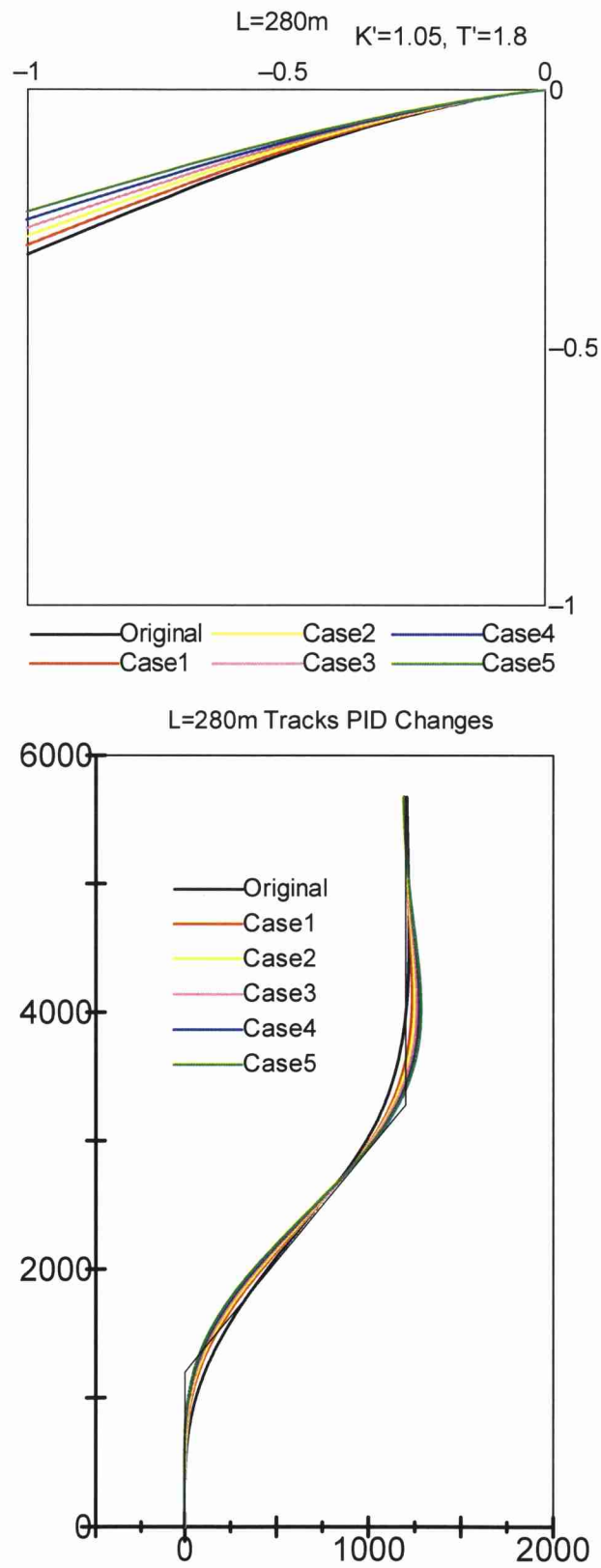


図 2.18 船長 280m 操船者特性改善

船長 100m および 280m のそれぞれのケースにおいて、位相余有は減少するとともに、操舵による船体の応答は振動形を示しながら、設定航路線に追従している。しかし、船長 100m では操舵による船体の応答はオーバーシュート形を示しており、元の正規化係数によるそれぞれのケースの間には顕著な相違は認められない。一方、船長 280m では元の係数による操舵による船体の応答はアンダーシュート形を示しているのに対し、修正を加えた数値による操舵による船体の応答は減衰振動形となっていることが示された。これ故、操船者特性の改善は大型船に対して効果的であることがわかる。

したがって、本研究において操船者特性の改善は大型船を対象に行うこととする。そして、大型船を対象として操船者特性を改善するためには操船者特性を表す状態変数を表示することで横偏位量制御係数 K_x と回頭角速度制御係数 K_d を増大させることが必要である。

2.4. 操船者支援

2.4.1. 状態変数の表示方法

前節の検討結果を元に、操船者特性を改善するための状態変数表示システムを検討する。

2.4.1.1. 状態変数表示の制御的意味

まず、従来の操船システムについて、操船者特性を表す状態変数の表示がどのようなになっているか吟味する。

従来の操船システムでは操船者特性を直接表す状態変数の表示としては、回頭角速度計があるに過ぎない。船首方位偏角、横偏位量については、それぞれ、船首方位、現在船位を操船者が観測して基準値である設定針路および設定針路と比較して求める必要がある。特に、現在船位を観測してから横偏位量を求めるには一定の時間が必要である。

また、回頭角速度計について操船者は回頭角速度の大きさ、向きの他、回頭角速度の発達と減衰の様子も把握しながら操船している。この際、操船者はこれらの状況を回頭角速度計の計器版目盛を指す指針の動きを注視することで得ている。したがって、操船者が正確に船体運動を把握するためには一定時間、継続的に指針の動きを観察する必要がある。

ここでこのような操船者の操船行動を制御的な観点から検討を加える。

現在船位と設定航路線との横偏位量を把握し、この横偏位量に比例して設定航路線に復す動作は積分動作となる。また、船首方位と設定針路との船首方位偏角を把握し、この偏角に比例して設定針路に復す動作は比例動作となる。さらに、この時の操舵によって発生した船体の回頭運動を観察しながら操船者が適当と考えた時点で回頭運動を段階的あるいは、連続して止める動作は微分動作となる。

一方、航路航行操船では操船者は保針、変針、復針を組み合わせる設定航路に追従して操船している。この時、保針は比例動作と微分動作を組み合わせた制御を行っている。また、変針と復針では積分動作、比例動作、微分動作をそれぞれ、組み合わせる制御を行っている。ところで、通常、操船者は一定の時間間隔で船位確認を行っているので、これ故、復針も一定時間毎に行っていることになる。つまり、積分動作も一定時間毎に行っていることになる。

これに対して、状態変数表示を行った場合は常に船首方位偏角、横偏位量、回頭角速度を操船者に提示することになる。したがって、航路航行操船における保針、変針、復針の各フェーズにおいて状態変数の表示が行われることになり、実際の操縦性能の把握が精度良く行うことができ、操船者の適応制御特性向上が可能となる。

2.4.1.2. 状態変数表示の基本構想

本研究では状態変数を操船者が直感的かつ正確に把握できるような表示を行うこと

によって操船者特性を改善することを考案した。

まず、現状の操船システムにおいて回頭角速度計は、回頭角速度の大きさ、方向の他、発達および減衰の各状態を表している。しかし、操船者が、回頭角速度計からこのような船体の回頭運動に関する情報を取得するためには、一定時間回頭角速度計を注視する必要がある。

次に現状の操船システムにおいて直接、横偏位量を表示する航海計器はない。操船者はクロスベアリング、レーダ、GPS 等、様々な測位手段を利用して求めた自船船位を海図に転記することで、設定航路線からの横偏位量を算出している。

したがって、操船者が船体運動の状況を直感的に把握できるための状態変数表示方法を検討することとした。そのために 2 次元図形と色の使用により、状態変数の状態を表示することを考えた。

回頭角速度と横偏位量の二つの状態変数の表示画面設計における検討内容を項目毎に示す。

(1) 表示全般

状態変数表示は自船の船体運動状態を表すことを目的としている。したがって、自船を真上から鳥瞰して表示することで操船者が自船の運動状態を客観的に捉えることが可能となる。このため、状態変数表示は平面上に 2 次元図形によるシンボルを自船として表すこととした。

また、各状態変数のそれぞれの基準からの偏位は左（左舷）を緑色、右（右舷）を赤色とすることで操船者の実船操船時の感覚に合わせることにした。

さらに、状態変数を 2 次元図形と着色で表現することの他、表示時点における状態変数の数値情報を同一画面に表示することとした。状態変数の数値表示によって、状態変数を表すシンボルの動きを確認することができるものと考えた。

(2) 回頭角速度の大きさと方向の表示

回頭角速度の大きさを直感的に把握するため、自船の船首尾線上船首側から左右に船体の回頭運動をイメージした扇状シンボルを使って回頭角速度の大きさを表すこととした。すなわち、回頭角速度の大小は扇状シンボルの面積によって把握することができる。また、回頭運動は偏位の表示とは異なり、継続的に表されるものであるため、扇状シンボルとして表現することが望ましいと考えた。さらに、船体の回頭運動を際立たせて表すため、および次項(3)で触れるように固定の船形を回転の中心に表示することとした。

この時、左回頭時は緑色、右回頭時は赤色に扇状シンボルの外縁を着色して表す。

(3) 回頭角速度の状態の表示

回頭角速度が現在、発達中であるのか、衰退中であるのかを判断することは操船状態を把握する上で重要な要因である。したがって、回頭角速度が発達中か衰退中かを上記(2)項の自船船形シンボルの中で同時に表現することとした。

回頭角速度が発達中である場合には、自船船形シンボルの面積を橙色で表示し、

衰退中である場合には灰白色で表示した。また、回頭角速度の変化がない場合には左右どちらかの回頭に対応する色で対応することとした。

なお、この際の色使用については JIS-Z8518 「人間工学－視覚表示装置を用いるオフィス作業－表示色の要求事項」を参考とした。

(4) 横偏位量の表示

横偏位量は設定航路線と自船舶位との偏位量として表示する。このため、設定航路線を表示画面の左右の中心に固定し、設定航路線の上下中心を画面中心と一致させる。そして、現在船位を表示画面上下中心に表示することで設定航路線からの左右の横偏位を表示することとした。

この際、操船者に船首方位、回頭角速度の表示としての予断を与えないため自船を表すシンボルを船形ではなく、円で表わす。さらに、左偏位時には円を緑色に着色し、右偏位時には赤色に着色表示する。

横偏位量は設定航路線と現在船位との間の間隔により表される。そして、この表示により操船者は横偏位量の大きさ、偏位の方向を直感的に捉えることができるものと考えた。

2.4.1.3. 状態変数表示画面

以上の検討を元に船首方位偏角、横偏位量、回頭角速度の各状態変数を表示することで、それぞれに対応する操船者特性を表す制御係数を増大させるための状態変数表示画面を考案した。

本研究では操船シミュレータを利用することでこれらの状態変数をホストコンピュータから LAN を介して得ることとした。実験システムを図 2.19 に示す。

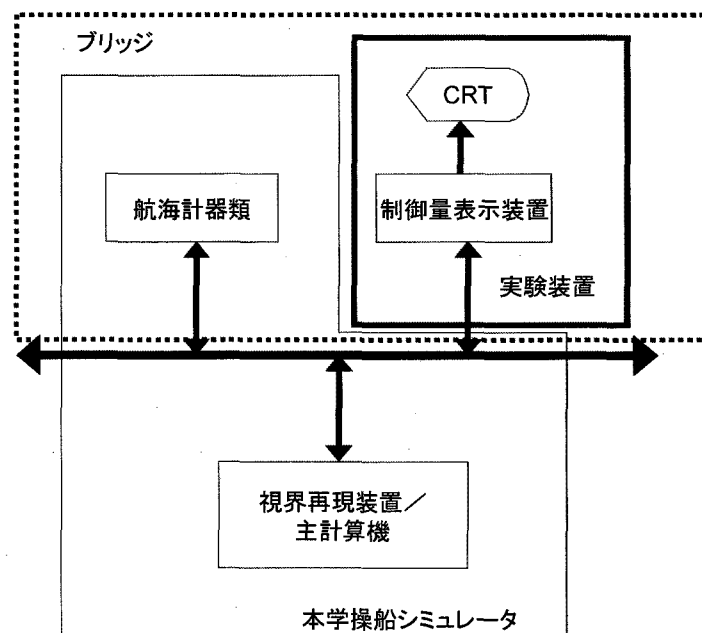


図 2.19 状態変数表示実験システム

実船において、これらの状態変数は船体運動のセンサ出力を利用することで表示できるものと考えられる。

状態変数表示システムは横偏位量表示画面、回頭角速度表示画面から構成されている。

(1) 横偏位量表示画面

横偏位量表示画面を図 2.20 に示す。

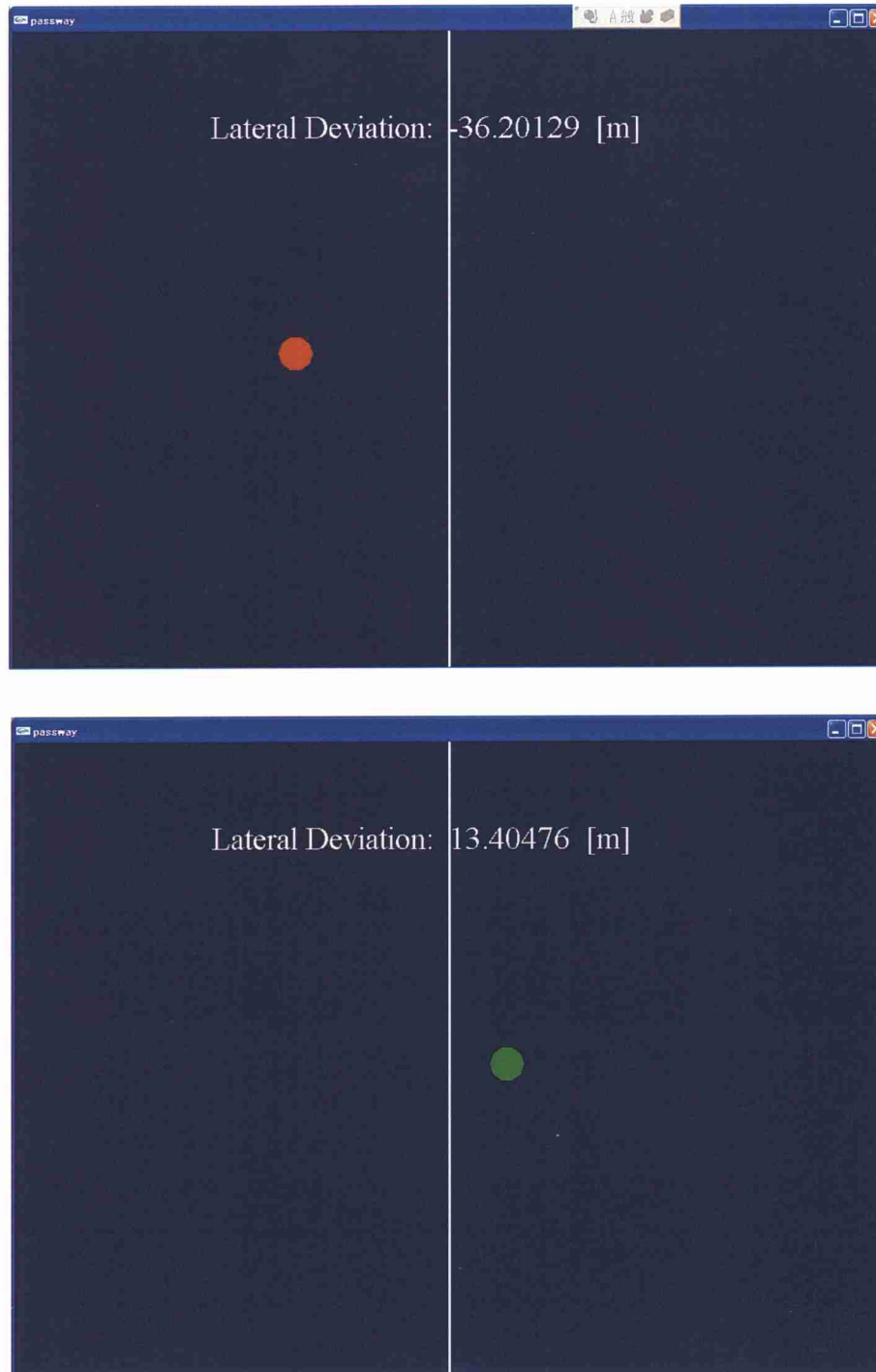


図 2.20 横偏位量表示画面

(2) 回頭角速度表示画面

回頭角速度表示画面を図 2.21 と図 2.22 に示す。

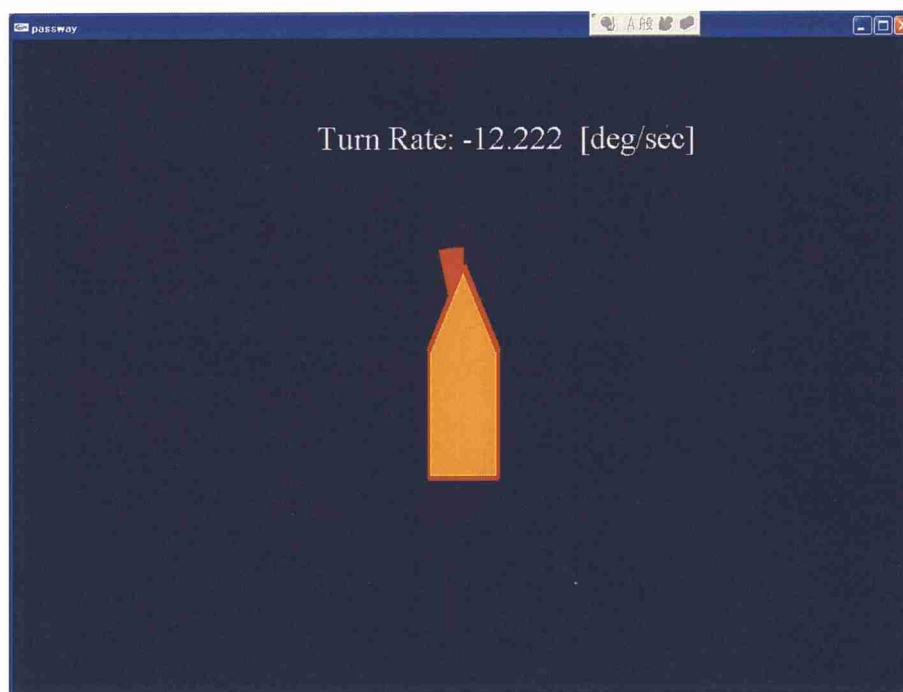
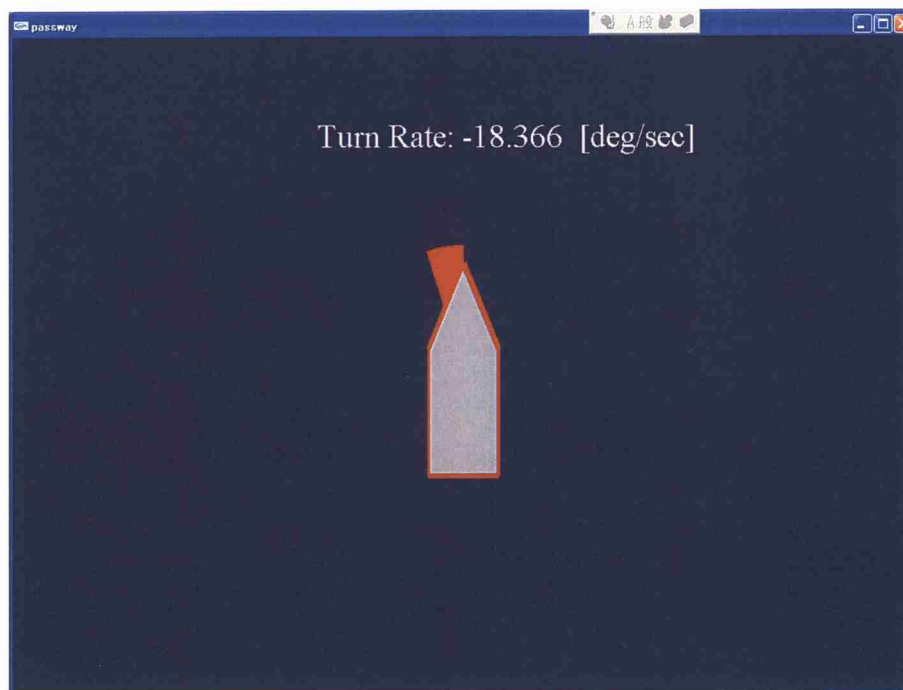


図 2.21 回頭角速度表示画面（左回頭時）

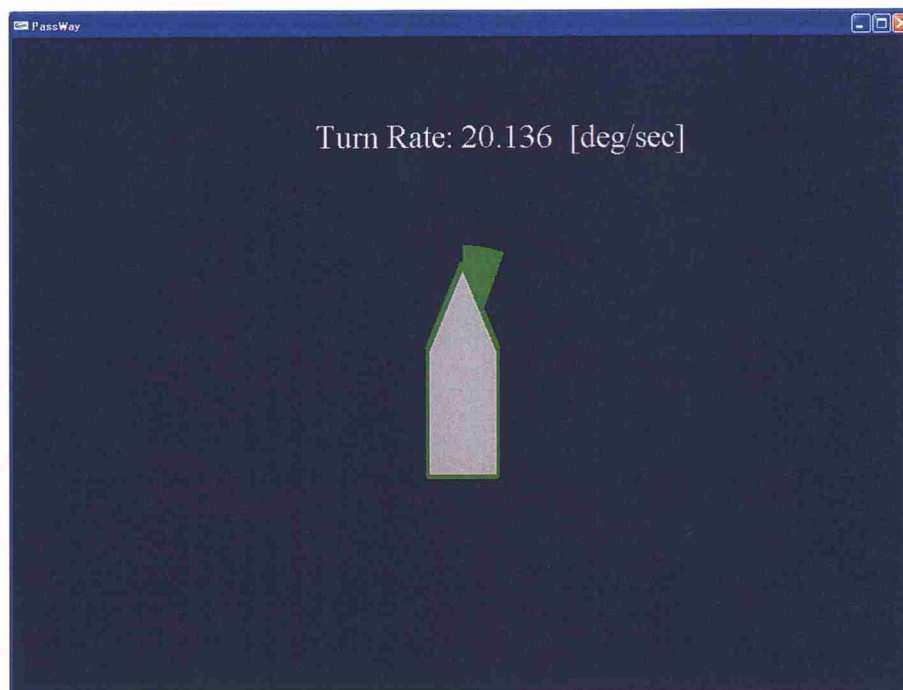


图 2.22 回頭角速度表示画面（右回頭時）

2.4.2. 状態変数表示実験

前節までの考察結果を元に本研究で考案した状態変数表示システムを使って操船シミュレータ実験を行った。以下、実験について示す。

(1) 目的

操船者に対して横偏位量、船首方位偏角、回頭角速度の状態変数を適切に表示することによって操船者特性として表される各制御係数が増大し、このような制御係数による航路航行操船結果は設定航路線からの横偏位量が最小となることを示す。

結果として、操船者特性が改善できることを明らかにすることを目的とする。

(2) 実験内容

状態変数表示システムを本学操船シミュレータと接続し、操船シミュレータから操船中に状態変数をリアルタイムで取得するとともに、前節に示した3つの状態変数表示画面をそれぞれ、単独に操船中に操船者に提示する。この時のシナリオは、平行移動操船とし、横偏位量、船首方位偏角、回頭角速度に対する制御係数を求める。

(3) 実験条件

ア. 供試船

供試船は以下の船とする。

① 100m 小型鋼船

$T'=0.9$ 、 $K'=1.2$ 、 $L=100\text{m}$

② 280m コンテナ船

$T'=1.8$ 、 $K'=1.05$ 、 $L=280\text{m}$

イ. 被験者

被験者は経験豊富な船長、航海士数名とした。

ウ. 外力条件等

外力はなしとし、地形的拘束による影響を排するためにオープンシーの設定とした。

エ. 実験条件

状態変数は以下の条件の下で表示した。

① 状態変数の表示なし

ジャイロコンパスレピータによる船首方位角表示なし、回頭角速度計による回頭角速度表示なし。

② 船首方位偏角

ジャイロコンパスレピータによる船首方位角表示のみ。

③ 横偏位量

横偏位量表示画面による横偏位量表示のみ。

④ 回頭角速度

回頭角速度計を隠し、状態変数表示システムの回頭角速度表示による回頭角速度の把握のみ。

2.4.3. 操船支援実験結果

状態変数表示実験の結果を以下に示す。

(1) 操船者制御係数算出結果

各表示において操船シミュレーション実験時に記録された舵角、横偏位量、船首方位偏角、回頭角速度の回帰分析によって操船者毎に求められた制御係数を平均したものを表 2.6 と図 2.23 に示す。

これらの図表から、以下が明らかとなった。

ア. 自船種類が船長 100m

- ・ Lat. Dev. (横偏位量) 表示の場合、Kx、Kp、Kd は No. Support (表示なし) の場合より増大している。
- ・ Turn Rate (回頭角速度) 表示の場合、Kx、Kp は Lat. Dev.表示とほとんど等しいが、Kd については Lat. Dev.表示の場合より若干、減少している。
- ・ No. Support を除く各表示の場合、表示対象とした状態変数に対応した制御係数のみならず、他の状態変数に対応した制御係数も増大している。

イ. 自船種類が船長 280m

- ・ Heading (船首方位) 表示の場合、Kx、Kp、Kd は No. Support の場合よりも減少している。
- ・ Lat. Dev.表示の場合、Kx、Kp、Kd は No. Support の場合とほぼ等しい。
- ・ Turn Rate 表示の場合、Kx、Kp、Kd は他の場合よりも顕著に増大している。

表 2.6 制御係数

100m				
	No Support	Heading	Lat. Dev.	Turn Rate
Kx[deg/m]	0.0599	0.0891	0.1090	0.1148
Kp[-]	0.6212	0.9270	1.0246	1.0871
Kd[m]	49.85	74.01	88.20	82.19
Kd[rad]	0.87	1.29	1.54	1.43

280m

	No Support	Heading	Lat. Dev.	Turn Rate
$K_x[\text{deg/m}]$	0.0584	0.0374	0.0582	0.1819
$K_p[-]$	1.3188	1.0885	1.3621	2.3325
$K_d[\text{m}]$	276.27	252.12	302.97	454.64
$K_d[\text{rad}]$	4.82	4.40	5.29	7.93

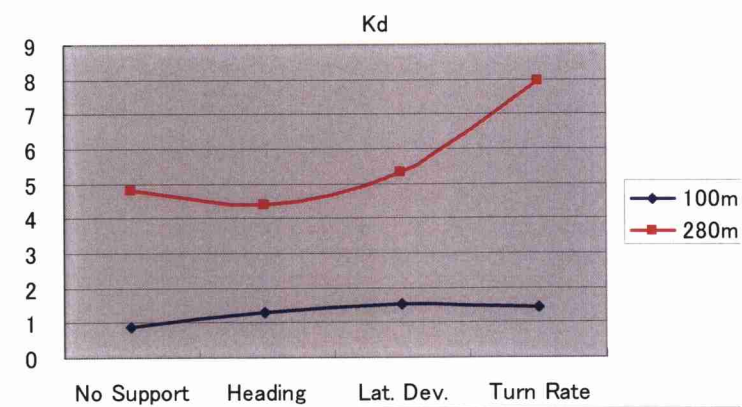
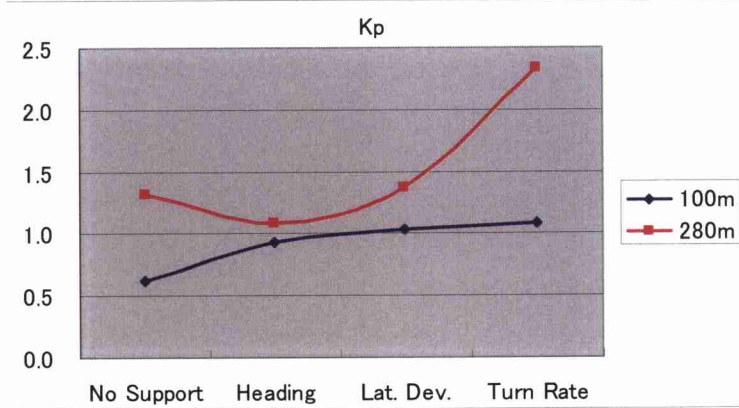
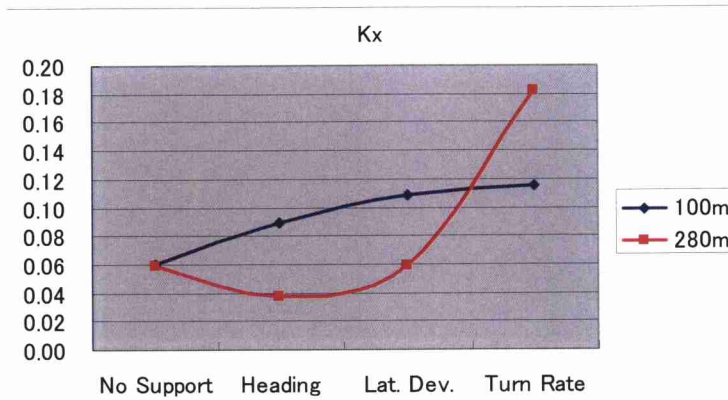


図 2.23 各表示における制御係数

(2) 周波数特性比較

上記(1)項で求められた制御係数を使って、系の周波数特性を調べるために Nyquist 軌跡を求めた。船長 100m、280m に対して各表示による K_x 、 K_p 、 K_d と伝達関数による Nyquist 線図を図 2.24 に示す。

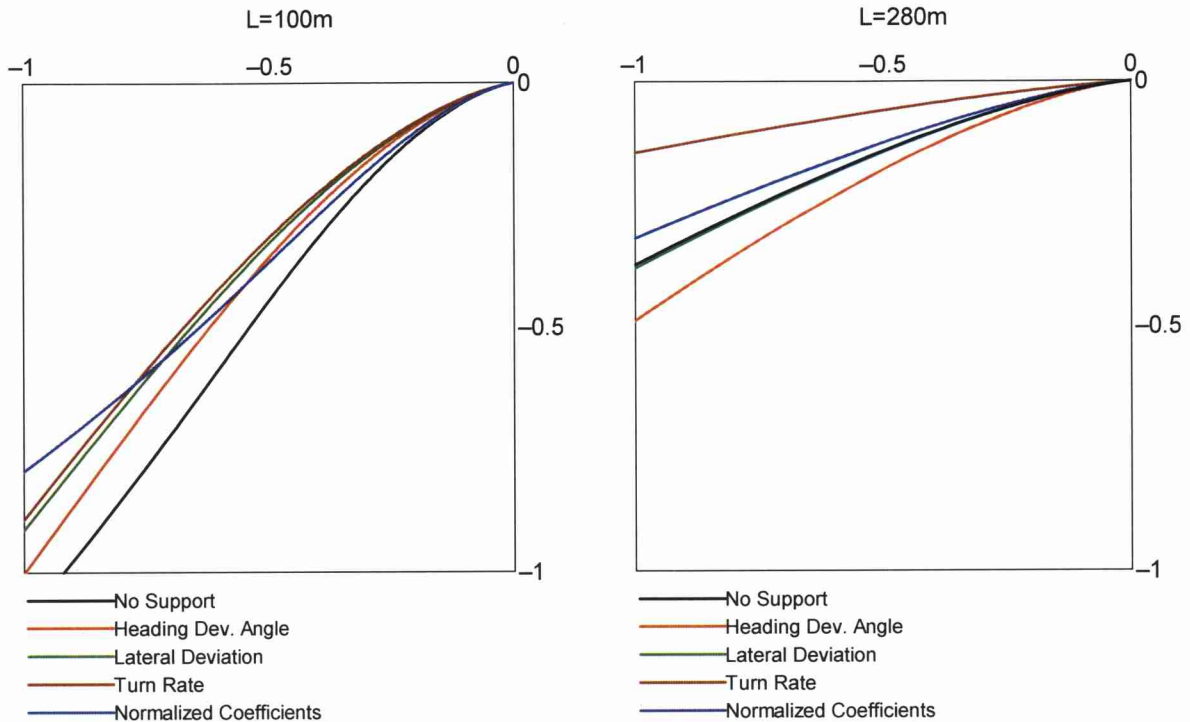


図 2.24 Nyquist 線図

図 2.24 から、以下が明らかとなった。

ア. 自船船種が 100m

- ・ 位相余裕は No. Support (表示なし)、Heading (船首方位表示)、Lateral Deviation(横偏位量表示)、Turn Rate (回頭角速度表示) の順に減少する。
- ・ Lat. Dev.と Turn Rate の位相余裕の差異は微小である。
- ・ 位相余裕最大の No. Support と同最小の Turn Rate の差は小さい。

イ. 自船船種が 280m

- ・ 位相余裕は Heading、Lateral Deviation、No Support、Turn Rate の順に減少する。
- ・ No Support と Lateral Deviation の位相余裕は、ほぼ等しい。
- ・ Turn Rate とその他の表示の間の位相余裕の差は顕著である。

(3) 数値シミュレーション結果比較

上記(1)項で求めた制御係数を使った航路航行の数値シミュレーションによる航跡

の時系列変化を図 2.25 に示す。また、2.2.3 節で示した正規化制御係数を使った数値シミュレーションによる航跡の時系列変化との比較を図 2.26 に示す。また、この時の横偏位量を表 2.7 および図 2.27 と図 2.28 に示す。

表 2.7 横偏位量

100m			280m		
	Average	Max		Average	Max
No Support	9.156	50.93	No Support	34.126	128.91
Heading	7.914	60.967	Heading	59.5	177.534
Lat. Dev.	6.541	51.98	Lat. Dev.	38.457	137.33
Turn Rate	6.466	55.321	Turn Rate	9.133	60.093
Normalized	14.72756	55.14793	Normalized	26.185	108.1109

図 2.25、図 2.26 および表 2.7、図 2.27、図 2.28 から以下が明らかとなる。

ア. 自船船種が船長 100m

- ・ 各表示間の平均横偏位量の最大値 (No Support) と最小値 (Turn Rate) の差は 2.7m と非常に狭い。
- ・ 平均横偏位量は No Support、Heading、Lat. Dev.、Turn Rate の順に減少する。
- ・ Lat. Dev. と Turn Rate の平均横偏位量はほとんど、等しいが Turn Rate の方が小さい。
- ・ Heading を除いて、No. Support を含む他の 3 表示はオーバーシュート形を示す。
- ・ オーバーシュート量は No. Support が最大であり、Lateral Dev.、Turn Rate の順に減少している。
- ・ Normalized (正規化係数) と Turn Rate を比較すると、Normalized の場合は Turn Rate よりもオーバーシュート量は増大しており、平均横偏位量も Normalized の方が Turn Rate より大きい。

イ. 自船船種が船長 280m

- ・ Turn Rate 以外の No. Support を含む表示はアンダーシュート形を示す。
- ・ アンダーシュート形を示す表示のうち、Heading、Lateral Dev.、No. Support の順に平均横偏位量は減少する。
- ・ Turn Rate はオーバーシュート形を示しながら、設定航路線に追従しており、平均横偏位量も最小となっている。
- ・ Normalized と Turn Rate を比較すると、Normalized は Turn Rate よりもオーバーシュート量は小さく、平均横偏位量は Normalized の方が Turn Rate より大きい。

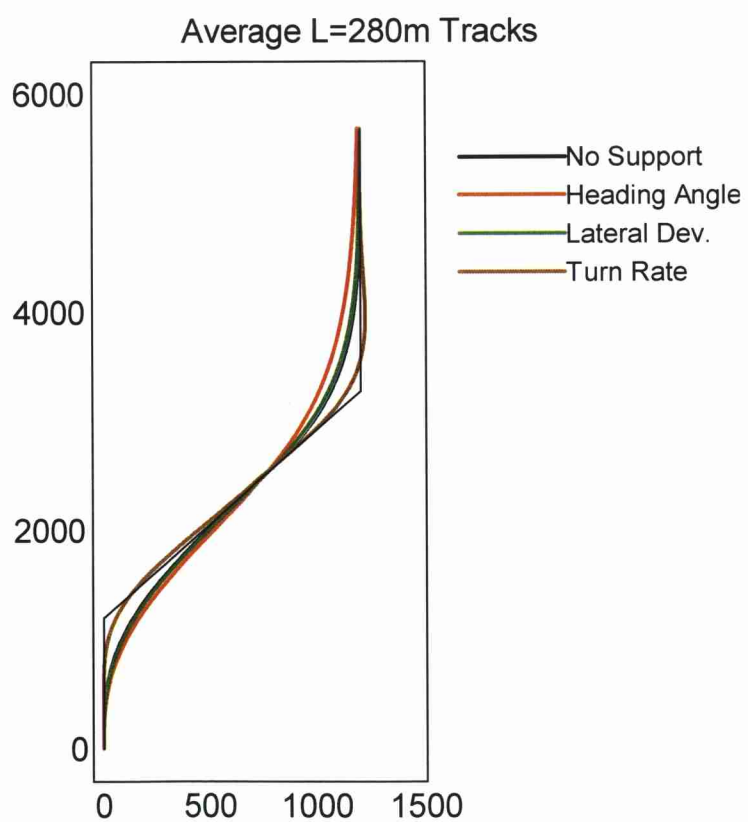
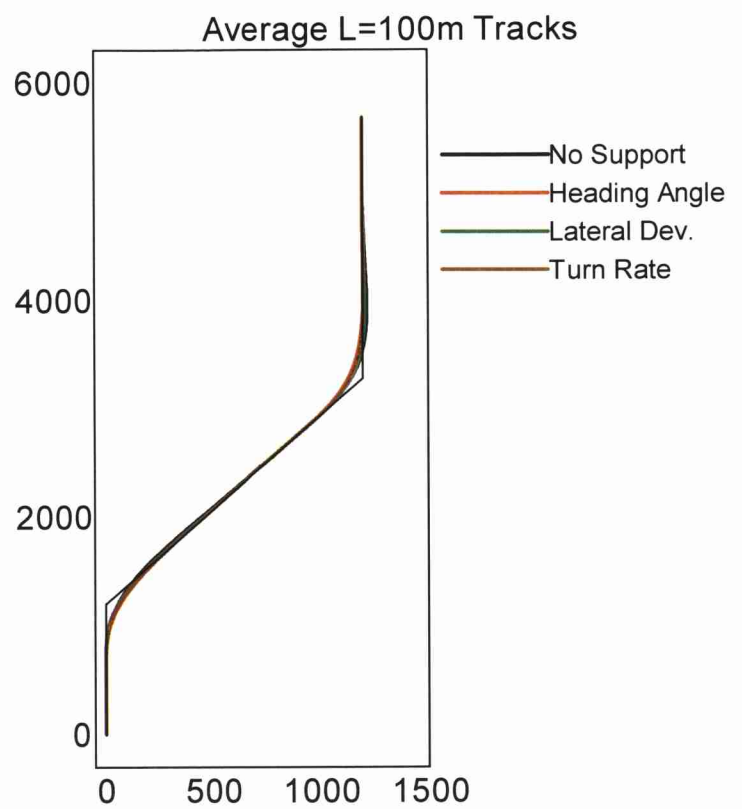


図 2.25 数値シミュレーション結果（表示毎）

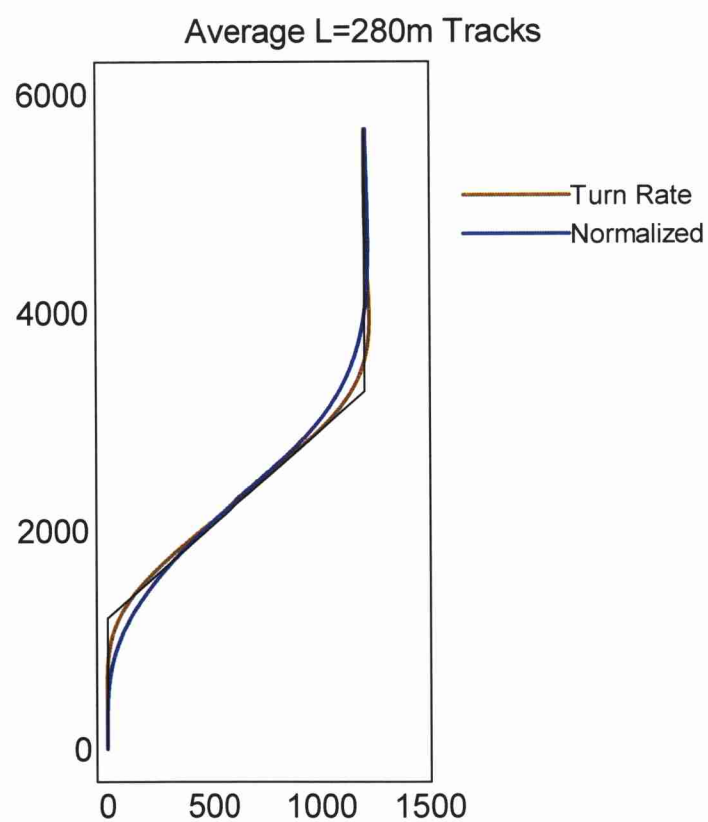
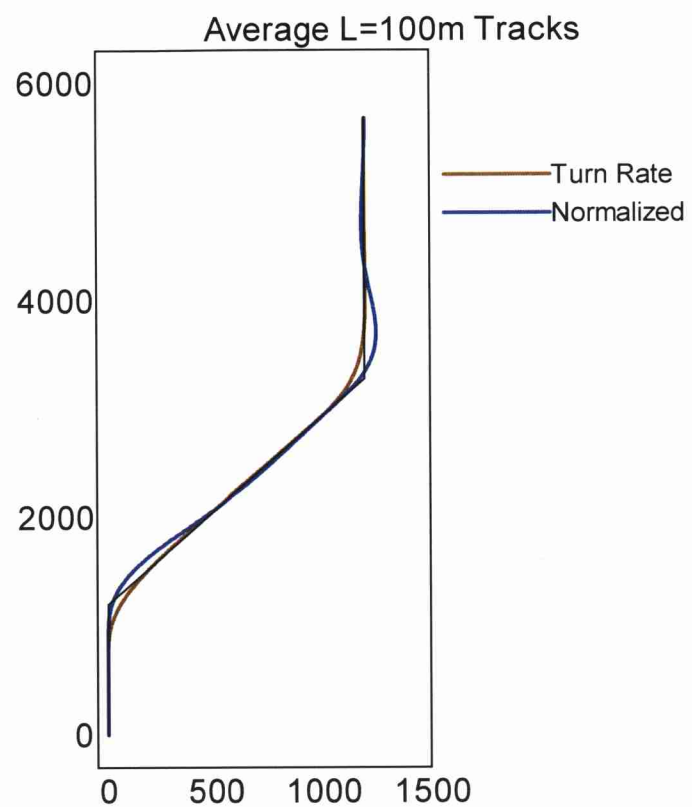


図 2.26 正規化係数との比較（回頭角速度表示と正規化係数）

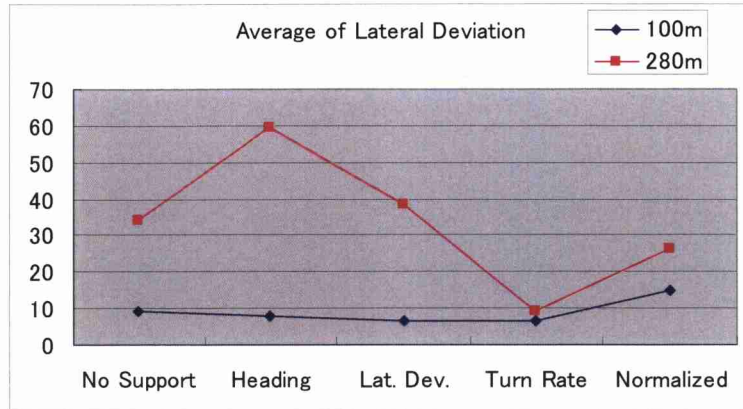


図 2.27 平均横偏位量

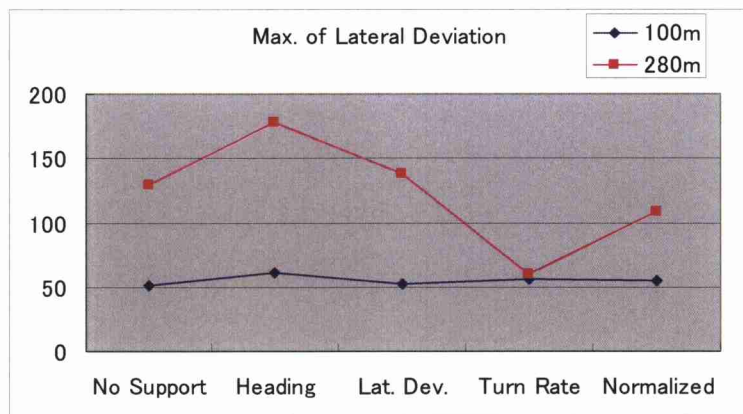


図 2.28 最大横偏位量

2.4.4. 操船支援表示による効果

上述した操船シミュレータ実験結果から船長 100m と 280m について、以下に示すようなことが明らかとなった。

(5) 船長 100m

制御係数を増大させる効果の観点から、回頭角速度表示における、 K_x 、 K_p の増大効果が大きいことがわかった。 K_d については、横偏位量表示が最大となっているが、回頭角速度表示の場合の K_d との差は僅少である。また、平均横偏位量は回頭角速度表示の方が最小となっている。さらに、周波数特性については船首方位表示、横偏位量表示、回頭角速度表示の順に位相余有は減少している。

これは、表示が何もない場合と比較して船首方位、横偏位量、回頭角速度のそれぞれに対する制御係数が増大したことによる。

すなわち、船長が 100m の小型船の場合、船首方位表示、横偏位量表示、回頭角速度表示の順で K_p 、 K_x 、 K_d の増大効果が大きく、平均横偏位量はこの順で逆に減

少していることから、操船者に対する支援効果はこの順で大きくなることを示している。

結局、船長 100m の小型船では回頭角速度表示を行うと、 K_p 、 K_x 、 K_d は表示を行わない場合よりも増大し、位相余有は減少するが、平均横偏位量は最小となることがわかる。そして、操舵による船体の応答は減衰振動を示す。これは、式(2.22)で示した PID 調節計を表す式によると K_p 、 K_x 、 K_d の全てが増大することは船体のゲイン定数 K_M を増大させたことに相当する。

次に、通常の操船システムとして Normalized (正規化制御係数) と回頭角速度表示を比較すると、 K_x 、 K_p 、 K_d はそれぞれ、回頭角速度表示の方が大きく、位相余有も回頭角速度表示の方が大きい。さらに、平均横偏位量は回頭角速度表示の方が小さくなっており、従来の回頭角速度計による操船より、船体操縦の制御結果は本研究で考案した回頭角速度表示による方が優れていることがわかる。

(6) 船長 280m

制御係数を増大させる効果の観点から考察する。

まず、船首方位表示は表示なしと比較すると全ての制御係数が減少している。また、横偏位量表示では、 K_x 、 K_p とともにほとんど表示なしの場合と等しく、 K_d のみが増大している。さらに、回頭角速度表示の場合は表示なしと比較すると全ての制御係数が顕著に増大しており、回頭角速度表示による制御係数増大効果が最も優れていることがわかった。

これを周波数特性と対応させて考察する。位相余有は主に K_x の減少から船首方位表示が最大となる。次に K_d の増加によって、横偏位量表示、表示なしの順に位相余有は減少している。また、 K_x と K_p の増大から回頭角速度表示が位相余有最小となっている。

さらに、航跡の時系列変化、つまり、操舵による船体の応答については、制御係数の前述した増減の変化を反映し、回頭角速度表示以外の表示では最大横偏位量が 100m を超えており、航跡を考慮すると操舵による船体の応答はアンダーシュート形となっていることがわかる。回頭角速度表示の場合のみが、最大横偏位量も 60m 程度と小さく、100m の場合とほとんど変わらない。また、これらを反映して平均横偏位量も 9.133m と最小となっている。

特に通常の操船システムである回頭角速度計による操船状態を示す Normalized も操舵による船体の応答がアンダーシュート形となっていることを考慮すると今回、提案した回頭角速度表示による操船者制御係数増加の効果が顕著であることがわかる。

以上を考察すると、船長 280m の大型船では本研究で提案した回頭角速度表示によって、操船者制御係数が顕著に増大し、航路航行の操船結果が良好となったことがわかる。

以上から、自船船種が 100m、280m のどちらの場合についても、本研究で考案した

回頭角速度表示によって、操船者制御係数は増大し、操船者の操舵による船体の応答は減衰振動形を示し、設定航路線からの平均横偏位量も小さくすることが示された。すなわち、この表示により、操船者の適応制御特性が向上できることが示された。前節でも示したように、操船者は制御対象の船の船長から操縦性能を推定している。そして、操舵時、フィードバックとしての状態変数に操船者特性を適応させている。状態変数の表示は、この際の操船者の適応制御特性を向上させるものであり、本節で行った状態変数表示の中でも回頭角速度表示において、この効果が顕著であることが示された。

本研究で考案した回頭角速度表示の大きな特徴は、回頭角速度について操船者が瞬時に以下の状態を把握することができることである。

- ・ 回頭角速度の大きさ
- ・ 回頭角速度の発達、衰退の様子
- ・ 回頭角速度の方向

これらの要素は、通常の回頭角速度計においては一定の観察の元に把握することができるものであり、操船者が見た瞬間にこれらの全てを把握することは困難である。

そして、このことは、通常の回頭角速度計による平行移動操船から求められた制御係数と比べ、本実験の回頭角速度表示から求められた制御係数の方が顕著に増大していることから明らかであることがわかる。

2.5. 本章のまとめ

操船者は航路航行操船において船首方位偏角、横偏位量および回頭角速度に関するPID制御を行っているとして表されることがわかった。そして、この時、船体の旋回性指数、追従性指数と船速、船長によって無次元化した制御係数は操船者の一般的な特性を表すものと考えられることが示された。この正規化された制御係数を使って周波数特性と操舵による船体の応答特性を求めた結果、船長の大小に係わりなく位相余有は、ほぼ一定で操舵による船体の応答は減衰振動を示すことがわかった。さらに、船体のゲイン定数 K (K') は正規化制御係数を表す式における K' と相殺され、 T_v/L として表されることが示された。これにより、追従性指数 T' が増加する場合には船体のゲイン定数も増加し、対象とする系の操舵による船体の応答特性は減衰振動形となる。また、横偏位量を減少させると同時に位相余有も減少することが明らかとなった。

また、船長 100m の船の操船者制御係数を使って船長 150m、200m、280m、330m の船に対して周波数特性および操舵による船体の応答特性を調べた結果、操船者には制御対象の船の船長に適応した適応制御特性があることが明らかとなった。

ここで、操舵による船体の応答の形状がアンダーシュート形の時には平均横偏位量は大きなものとなる。したがって、一般に大型船に関しては操舵による船体の応答を減衰振動形とすることで平均横偏位量を小さくすることができる。このために、操船者特性を改善する方法として、制御係数に対応する状態変数を表示することを考えた。

状態変数表示による操船者特性の変化を調べるため、まず、回頭角速度計の有無によって操船者特性がどのように変化するかを調べた。その結果、回頭角速度の表示がない場合、横偏位量制御係数は小型船については減少し、大型船については増加すること、船首方位偏角制御係数と回頭角速度制御係数は全ての船について増加することがわかった。また、周波数特性より位相余有は小型船については増加し、大型船については減少することがわかった。これらから、操船者には状態変数の表示に関する適応制御特性もあることがわかった。

このような状態変数表示に関する操船者の適応制御特性を向上させて良好な操船結果を得ようとすることを試みた。表示する状態変数は船首方位、横偏位量、回頭角速度とした。船首方位の表示については従来のジャイロレピータによるものとした。また、横偏位量、回頭角速度に関しては、新たに表示を開発して、操船者が瞬時にそれぞれの状態変数を把握できるような工夫を行った。

操船シミュレータ実験によってこれらの表示の効果は、小型船と大型船に対して回頭角速度の表示によるものが最も高いことが示されたが、大型船の場合の方がより、顕著に制御係数を増加させることが明らかとなった。

また、どちらの場合でも、表示の対象となった回頭角速度に関わる制御係数 K_d だけでなく、横偏位量、船首方位に関わる制御係数 K_x 、 K_p の増加が認められた。これらの制御係数の増加により、位相余有は減少するものの、平均横偏位量は表示なし、あるいは、他の二つの状態変数表示の場合、および、通常の操船システムの場合よりも減少していることが示された。

以上の結果から、本研究で考案した回頭角速度表示方法により、操船者の操舵による

船体の舵応答はオーバーシュート形を示し、平均横偏位量は最小とすることができる、つまり、良好な操船結果が得られることが明らかになった。

また、これらの結果から操船者の従来の回頭角速度計による回頭角速度の把握よりも本研究で考案した回頭角速度表示による回頭角速度の把握の方が効果的であることがわかる。

3. 避航操船における操船者支援

これ以降の章では、基本的な操船場面ではあるが、操船者に対する負荷が高くなると操船の困難度が高くなる避航操船についての操船支援を検討する。そのために、まず、人間の一般的な情報処理について明らかにし、次に現状の避航操船における問題点として、他船行動の不確定性に焦点を当て、このような状況における操船者への支援方法を検討する。

そして、実際に操船者を支援する情報表示を開発するとともに操船シミュレータ実験によりその効果を確認し、避航操船における操船者に対する効果的な支援方法の提案を行う。

3.1. 人間の情報処理の限界

3.1.1. 人間の情報処理

人間は外部環境の変化の中から行動目的に関連する情報を抽出する。そして、抽出した情報について行動目的と照らした評価を行うとともに行動目的を実現するための行動計画を立案する。最後にこの行動計画に従って行動目的を実現するために行動する。このような一連の人間の知的活動は情報処理として知られている。

人間の情報処理の一連の流れは、図 3.1 に示すように行われる。そして、情報処理の各過程は以下に示すように定義できる。

- ・ 情報収集・・・外部の環境変化の中から、予定行動に影響を与える情報を抽出すること。
- ・ 情報解析・・・抽出した情報と予定行動とを対比して、抽出情報の予定行動に対する影響を斟酌し、爾後の予定行動への影響の予測を行うこと。
- ・ 意思決定・・・解析結果を元に必要なら予定行動の修正を行い、行動計画を作成すること。
- ・ 行動・・・外部環境の変化に対応した行動計画を実行すること。

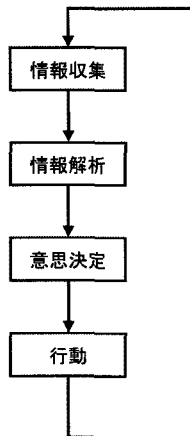


図 3.1 人間の情報処理

人間は外部の環境変化の中から予定行動に影響を与える情報を抽出し、予定行動に対する影響を予測する。そして、予定行動の修正と行動計画を作成し、外部の環境変化に応じた行動計画に従って行動することになる。そして、その行動結果をまた、情報収集過程にフィードバックするとともに新しい情報を収集して、以降の情報処理のループを継続的に行う。

したがって、情報収集、情報解析の精度の良し悪しは引き続く意思決定、行動に大きな影響を与えることになる。特に情報解析の精度が悪いことは意思決定において誤判断を引き起こす原因ともなるため、予定行動への影響の予測には正確さを期す必要がある。故に情報解析に対して支援を行うことが人間の情報処理の向上において、効果的となる。

3.1.2. 情報処理能力の限界

外部の環境変化による行動目的の多様化、曖昧化によって人間の情報処理は良好に行われないことがある。このような時、人間の情報処理能力は限界を示す。情報処理能力が限界に達すると行動目的を実現することができない。この節では人間の情報処理能力が限界となる原因について検討する。

(1) 情報収集における能力の限界

人間の情報処理能力が限界となる原因として、情報収集過程において情報量の増大およびそれに伴う抽出情報量の増大が考えられる。人間が処理可能な情報量は一定であるため処理すべき情報量が増大することは、人間の情報処理能力の限界を超えることとなる。したがって、情報収集過程においてはある一定の情報量を超過すると完全な情報収集が行えなくなることとなる。これは、一部の抽出すべき情報がこのような大量の情報の中から抽出できないことを意味する。

この結果、解析過程においては解析すべき抽出情報は不完全なものとなってしまう。さらに判断過程においては予定行動の誤差の増大を招来する。これらの結果として、情報処理の最終段の行動過程においては外部環境変化に対応する行動の誤差拡大とその帰結として行動余地の減少をもたらすことになる。

(2) 情報解析・意思決定における能力の限界

情報解析における能力の限界をもたらす一因として、予定行動に対する影響を予測する際の誤差の発生が考えられる。情報解析における予測誤差の発生は、意思決定における予定行動の大幅な修正を余儀なくする。これは、影響予測に基づいて行動計画を立案するため、予測に誤差が生じると、誤差修正のために今までの行動計画の破棄と新規の行動計画の作成を行う必要があることを示す。したがって、情報解析過程における解析誤差は以降の情報処理を遅延させることになる。

予測誤差の発生の原因は予測外の事象の発生によるところが大きい。この予測外の事象は不確定事象と呼ばれ、人間の想定外の事象とされる。情報解析過程における不確定

事象の発生は避けられないが、予め不確定事象の種類と発生状況を想定しておくことで、行動計画の立案、実行における情報処理の混乱を抑えることができるが、想定外の不確定事象が発生した場合には対応することは困難となる。

(3) 行動における能力の限界

行動計画に高い精度が要求され、冗長性が全くない場合に人間は行動における能力の限界を示すことがある。このような状況は緊迫した状態であり、人間の行動について失敗が絶対に許されない状況が多い。そして、行動における人間の能力の限界は行動の失敗につながることが多い。そして、行動の失敗が情報処理の失敗と見なされることが多い。

3.1.3. 情報処理における支援

情報処理における人間の能力の限界を支援することで、人間は外部環境の変化に対して適切に対応行動を取れるようになる。前節で検討したように情報処理における人間の能力の限界は、情報収集過程と情報解析過程に問題がある。したがって、これらの過程に対して適切な支援を行うことによって情報処理能力を改善することができると考えられる。

(1) 情報収集過程における支援

情報量の増大に対して人間の情報収集能力を適切に適応させるように支援することで情報収集能力の改善が期待できる。このために、増大する情報量を人間が容易に把握することができる表示が必要となる。また、この表示上において予定行動に影響を与える情報の抽出が容易に行えることが必要である。

このような支援表示によって、情報量増大の際の情報収集過程における人間の能力は向上させることができる。具体的には人間が処理可能な情報量の限界を引き上げることになる。人間の情報収集における能力を向上させることは、単位時間当たりの処理可能な情報量が増加することになる。

この結果、後段の情報解析、判断、行動の各過程に対しても改善が期待できる。

(2) 情報解析および意思決定過程における支援

情報解析および意思決定過程においては、予測することが困難な事象による誤差の増大が問題となる。

そこで、このような不確定事象を確定事象とすることで情報解析過程における予測誤差を減少させることができる。一般に不確定事象を確定化するためには、新たな情報が必要とする。したがって、このような新情報の提供を受けることができることが前提となる。

予測誤差の減少によって、判断過程における行動計画は確実なものとなり、行動過程において行動計画実行時の予測誤差の修正を行う必要がなくなる。

(3) 行動過程における支援

高い精度が要求される行動計画を実行する上で、直接、行動に関する情報を人間に提示することによって行動の失敗を避けることが可能となる。すなわち、行動支援情報として情報収集過程で抽出した情報とは別に、実行時に直接関連する情報が必要となる。このような情報は、人間の行動における特性を改善できるような情報である必要がある。人間の行動における特性を改善できるような情報支援の一例として、本論文第2章の航路航行操船における操船支援方法が挙げられる。

すなわち、行動過程における支援では人間特性を直接改善することで行動の失敗を回避することができる。

3.2. 避航操船における操船者の負荷

3.2.1. 避航操船における操船者の情報処理

避航操船において操船者は次のように行動する。

まず、周囲の船と自船の相対位置関係を把握し、自船が避航しなければならない対象船を選ぶ。そして、目視やレーダ・ARPAを使用し相対方位、速力を定期的に観察することで対象船の動向を把握する。それから、自船の操縦性能を勘案して対象船を安全に航過するための避航計画を立案する。この避航計画の中には、避航開始距離・時間、対象船とのDCPA（最小接近距離）、TCPA（最小接近時間）、安全航過距離などが定められる。そして、この避航計画に沿って他船を避航する。通常、避航中においても操船者は対象船の動向に注意を払っており、推測した他船動向の確認に努めている。また、自船が避航することで新たに発生する他の船との見合い関係にも注意を払っている。

このような操船者の一連の避航のための操船行動も情報処理として捉えることができる。この時、操船者の避航操船における情報処理の各フェーズは次に示す内容となっている。

情報収集：自他船の相対位置関係を把握し、自船が避航しなければならない他船を識別する。

解析：他船の針路予測、将来位置予測を行う。

意思決定：自船の航行に対して他船の動向が危険か否かを判断し、当該他船に対する避航計画を立案する。

行動：避航計画に基づいて他船を避航する。

操船者は情報処理能力を十分に発揮することによって、安全で確実な避航操船が行えることになる。

ここに示したのは避航対象となる他船が1隻だけの場合の基本的な避航操船であるが、実際の操船場面ではより複雑な避航操船が要求されることが一般的である。

3.2.2. 操船者に影響を与える負荷要因

実際の操船場面では航行海域における船舶密度が高いことから、他船数の増加および他船と遭遇し避航する回数も増加する。より具体的には連続して他船を避航しなければならない場合、あるいは、同時に複数の他船を避航しなければならない場合などがある。このような環境の変化は操船者に影響を与える負荷要因となる。

したがって、輻輳海域における避航の場合、操船者の情報処理は操船者に対する負荷に影響される。操船者に対する負荷には様々なものが考えられるが、情報処理の観点から情報収集、情報解析・意思決定、行動の各フェーズに影響する負荷の存在が考えられる。

特に次に示した項目は操船者に高い負荷を与えると考えられる。

① 複数の見合い関係の発生

同時に複数の他船に対して相対位置の確認を行い、この複数の船舶との相対位置関係から自船が避航しなければならない他船を識別しなければならない。したがって、複数他船と自船位置との相対位置関係の把握と自船に対する影響の優先度を決定することを同時に行う必要がある。このため、複数の見合い関係の発生は操船者の情報収集に影響を与える。

② 他船動向の不確定性

他船の針路予測、将来位置予測を行う際に、他船の動向が不確定であると予測からはずれることとなる。実際の他船動向と操船者が予測する他船動向との誤差を操船者は修正しなければならないが、他船動向が確定できるまで情報解析は終了することはない。そして、情報解析の遅延は意思決定の遅延となり、結果として避航行動の遅れとなって情報処理全体に影響することになる。したがって、他船行動の不確定性は操船者の情報解析・意思決定に影響を与える。

③ 航行海域の制限

避航を行う上で航行海域に制限があることは避航計画に物理的な制約を課することになる。つまり、制限された航行海域の中で周囲の状況に応じた避航計画を実行する際、自船の船体操縦性能の範囲内で高い精度での船体制御が要求されることになる。したがって、航行海域の制限は操船者に高い負荷を与えることになる。

これらの高い負荷要因によって操船者の情報処理能力は大きな影響を受けることになる。

3.2.3. 操船者の情報処理能力の限界

実際の操船場面において、前節で示したような操船者に対する高い負荷要因は操船者が自身で解決できるものではない。したがって、このような負荷要因の発生は直ちに操船者の情報処理能力の限界を惹起することになる。

以下に操船者の情報処理の各フェーズにおいてどのように操船者能力が限界となるかを示す。

(1) 情報収集における能力の限界

先に 3.1.2(1)で述べたように人間が処理可能な情報量は一定であるため、処理すべき情報量が増大することは人間の情報処理、ここでは特に情報収集能力の限界を超えることになる。

これを避航操船における操船者の情報処理の中での情報収集過程について当てはめてみると次のようになる。

避航操船における情報収集では、周囲の状況の中から今後の自船航行に影響を与えるような他船を抽出することとなる。このような他船の存在は船舶通航が輻輳するほど増加する。このことは、多数の他船の中から同時に複数の対象船舶を抽出することを意味し、操船者固有の同時処理数を超過することになる。

そして、操船者の同時処理数を超過した残りの他船についての情報収集ならびに必要な情報の抽出は行われることがないままとなってしまうことになる。このような状態では、情報処理過程の後段である解析、意思決定、さらには行動の各情報処理に対して過少な情報に基づく誤差を誘引することになる。また、未抽出情報の存在は解析・意思決定から行動に至る間において追加の情報解析・意思決定を行う必要が生じ、行動しながらこれら追加の処理を実施することになる。この結果として、行動において精度が悪化するとともに経過時間が大きくなることにつながる。

(2) 情報解析・意思決定における能力の限界

操船者が予測する他船針路、将来位置と実際の他船針路、将来位置とが異なる場合、情報解析における誤差が生じる。この解析誤差は具体的には次のプロセスから生じることになる。

操船者は他船位置の観測結果から他船の将来動向を予測する。そして、他船動向の確定は予測した他船動向と実際の他船動向がほぼ等しいことであり、予測と実際の他船動向の誤差がごく、小さく許容できる範囲内にあることである。これとは逆に予測した他船動向と実際の他船動向が大きく異なる場合には予測誤差は非常に大きく、他船動向が不確定であることになる。

したがって、他船動向が不確定である場合の情報解析における誤差は大きなものとなる。そして、この誤差を修正するために操船者は他船動向が明確に把握できるまで情報解析を行うことになる。その後に解析した情報をもとに意思決定を行うことになる。したがって、他船動向の不確定性は情報解析および意思決定処理終了自体を不確定なものとし、さらに処理時間の増加をもたらすことになるため、避航行動の遅延という結果をもたらすことになる。

(3) 行動における能力の限界

行動は人間の情報処理の最終段にある情報処理過程である。このため、行動の段階では前段までの情報処理の各過程の精度が大きく影響してくることになる。

これを避航操船の場合で考えてみると、操船者は避航対象の他船を抽出し、その動向を把握するとともに将来の動向を予測する。そして、この予測に基づいて実際の避航計画を立案することが、行動の前段までの情報処理過程である。したがって、この時の避航計画における他船動向予測精度が高いものであれば、行動における操船者の能力（と船体運動性能）の限界に至らずに済まされることが多いことになる。他方、避航計画における他船動向予測精度が悪いと行動における操船者（と船体運動性能）の能力の限界を超えることになる。

この一方で航行海域には物理的な制約が存在することが多い。そして、避航計画では、航路や周囲の船舶の輻輳の状態から制限された航行海域の限られた航路を航行することを要求することがある。そして、操船者は正確に設定針路上を航行し、避航計画で決められた正確なタイミングで他船を避航しなければならない。この際に航行海域の物理的制約は、避航計画の実行の幅を狭めることになる。つまり、航行海域の物理的制限は操船者の能力と船体運動性能の限界をさらに拘束することになる。

3.2.4. 操船者の情報処理の支援

前節までに示したように輻輳状態における避航操船では操船者の情報処理が限界となる負荷要因があることがわかった。操船者に対するこのような負荷要因を取り除くとともに情報処理の各フェーズに対して操船者を支援することで操船者の情報処理能力は常に良好な結果を示すことが予想できる。

本節では操船者の情報収集、情報解析・意思決定、行動に対する支援について検討する。

(1) 情報収集に対する支援

操船者の情報収集能力を支援するためには同時に複数の他船を対象とした相対位置関係の識別に対する支援を行う必要がある。

操船者に対して自船を中心とした他船の相対位置関係と避航する必要がある他船の識別を容易に可能となるような表示を行うことが考えられる。

現状の操船システムでは、レーダ ARPA に同様の機能が具備されており、操船者は他船数が増加して処理すべき情報量が増加しても、レーダ ARPA の表示画面を監視することで同時に複数の船舶を対象として自船との相対位置関係の把握と避航対象船の識別を実行することが可能となっている。

しかしながら、レーダ ARPA においても他船との相対位置関係を識別するためには一定の操作が必要となる。このため、操船者が自船を中心とした他船との相対位置関係を容易に把握可能な表示が必要となることが予想される。

(2) 情報解析・意思決定に対する支援

操船者の情報解析・意思決定を支援するためには他船行動の不確定性をなくすことで確定的な行動とするための表示を行うことが考えられる。

他船行動を確定化するためには、対象とする海域を航行する全ての船舶に対して、予め、予定変針点、行き先等の情報を互いに通報する仕組みが必要となる。そして、対象海域を航行する全ての船舶が他の船舶からの予定変針点、行き先等の情報を表示する設備が必要となる。

このようなシステムがあることによって、互いに他船は周囲の船の航海計画を周知することとなり、他船の行動における不確定性は減少することとなる。それとともに、周

囲の他船の航海計画をもとに自船の航海計画を立案することが可能となる。

輻輳した海域を航行する場合、操船者は他船の針路、速力、行き先、変針点、船種、積荷、船名などの情報をあらゆる手段を講じて得ようとしている。このような情報は、操船者が目視、レーダ ARPA、国際 VHF で確認して得ている。しかし、多くの場合、これらの手段によって必要とする情報が得られることは少ないのが実状である。

これに対して、近年、AIS の装備が義務付けられるようになってきた。AIS では針路、速力、回頭角速度、船種、積荷、船名については、必ず表示（通報）しなければならない情報として規定されている。予定変針点についてはオプションとしての表示となっている。

したがって、AIS のフレームワークを利用することで他船行動の不確実性が低減される可能性がある。すなわち、情報解析能力支援については、AIS 情報を利用して他船の行き先表示と予定変針点表示を行うことで他船動向を確定化することができるものと考えた。

AIS 情報は AIS 情報表示器と同時にレーダ ARPA などへ表示することが可能となっている。ここにおいて、情報収集能力の支援についても AIS 情報のレーダ ARPA 画面への重畳によって行うことができるものと考えられる。

(3) 行動に対する支援

操船者の避航行動に対する支援は限られた航行海域において避航計画を実行するために自船の船体操縦性能を有効かつ効果的に発揮することである。

避航操船における避航計画では周囲の状況に応じて避航するための航路を動的に設定し、この設定航路に追従する必要がある。そして、避航計画にしたがって船体を制御する際には横偏位量を最小としながら設定航路を追従していかなければならない。このような操船支援は本研究第 2 章に示した航路航行操船における支援システムによって行うことができる。

すなわち、避航計画に定められた設定航路に対して横偏位量を最小としながら追従するために操船者特性を表す船体状態変数の表示を行うことが避航行動における操船者支援とすることができる。

3.3. 避航操船における操船者支援

以上、前節までの検討をもとに避航操船における操船者の支援方法を考案した。ここでは、先に述べたように操船者の情報処理のうち、情報解析・意思決定について支援することを主眼におく。すなわち、情報解析・意思決定における他船動向を確定するための表示によって操船者を支援することを目的とする。

3.3.1. 他船行動を確定化する情報表示

3.3.1.1. 他船動向の不確定性

避航操船において操船者は通常、一定時間毎の他船相対位置を観測することによって他船動向を把握している。特に、他船の将来位置は過去一定時間における観測結果に基づき、推測することになる。この時の他船位置はガウスマルコフ過程として知られる確率過程として表すことができる。この場合、白色正規雑音により他船将来位置推定誤差分布は表され、他船の位置の観測データによる離散カルマンフィルタによって他船の将来位置推定は近似できることになる。つまり、過去の一定時間の他船位置計測結果によって他船将来位置は一定の観測誤差とシステム誤差に基づいて推定することができる。

しかし、本研究で対象とするのは他船動向が不確定な場合である。この場合の不確定の意味は過去他船動向から容易に将来他船動向が推測できないことである。すなわち、他船は突然、今までの針路、速力を変更する場合もあることをこの場合の不確定として定義するものである。輻輳した海域における他船の不確定な動向は自船の爾後の行動計画に多大な影響を与えるものであり、本節ではこのような他船動向の不確定性が自船の避航計画にどのような影響を与えるか調査する。

3.3.1.2. 他船動向を確定化する情報

ここで、他船動向を確定化するために必要な情報について考察する。

通常、船舶通航の輻輳した海域において、他船動向が不確定な場合、操船者は国際 VHF を利用することで当該他船の今後の動向についての情報を直接、確認している。この時、操船者が必要とする当該他船に関する情報は他船の現在針路および速力に加えて行先と予定航路および変針点である。

これらの情報のうち、操船者が最も関心のある他船動向に関する情報は他船の行先と予定変針点である。他船の行先と予定変針点を把握することで他船動向の大部分が確定できる。これは、換言すれば次のように考えることができる。

すなわち、他船の行先については今後の当該他船の動向を合理的に推定するための前提条件を操船者に与えるものであり、予定変針点はこの推定を補強する判断材料を提供するものである。

したがって、他船動向を確定するためには、少なくとも他船の行先が判明している必要があり、さらに他船動向推定精度を向上させるために予定変針点が判明している必要

がある。

3.3.1.3. 他船行動を確定化する情報表示画面

以上の検討から、他船行動を確定化する情報表示として「他船行き先表示」と「他船行き先表示+変針点表示」の2表示を考案した。まず、比較のために表示が何もない状態を基本画面として図 3.2 に示す。

なお、これらの表示における自・他船を表す船形は、IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）で AIS 表示用シンボルとして検討されている内容を参考とした。

ただし、自・他船を区別するため、自船を赤色、他船を白色として表した。また、自・他船とも速力に対応した速力ベクトル表示を行っている。

さらに、本表示では自船と他船に関する情報表示を対象とするため、地形情報については重畳していない。

また、直接、他船情報には係わりがないものの、操船時の基本情報として必要な自船針路および速力を画面右下隅に表示した。これは、他船情報表示を損ねない配慮から行ったものである。

さらに、本表示は真表示とした。すなわち、画面上部は常に North を示している。

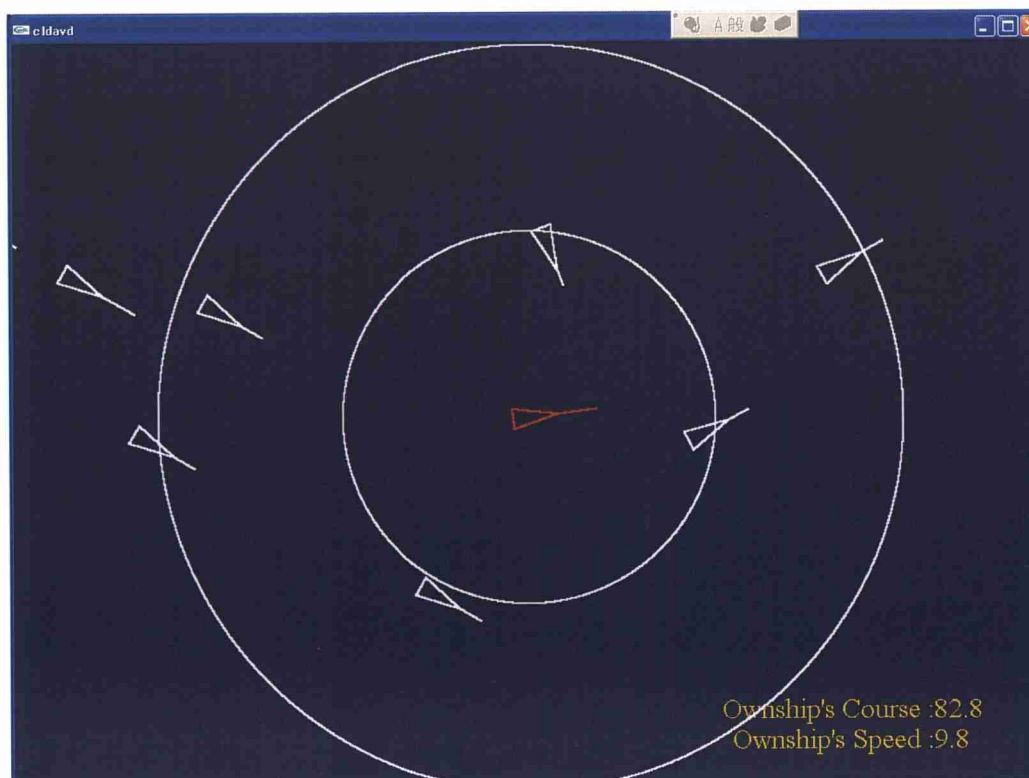


図 3.2 基本画面

(1) 行先表示

他船の行き先を表示することで他船動向の確定化を図ることとした。この表示は他船動向を操船者が推測する際に推測精度を向上させるための一助とするものである。他船位置表示に行先表示を付与することは他船の将来動向予測に対して一定の合理性を与えるものであり、行先表示のない場合に比べて他船動向の推定精度を高めるものと考えた。

行先表示画面を図 3.3 に示す。

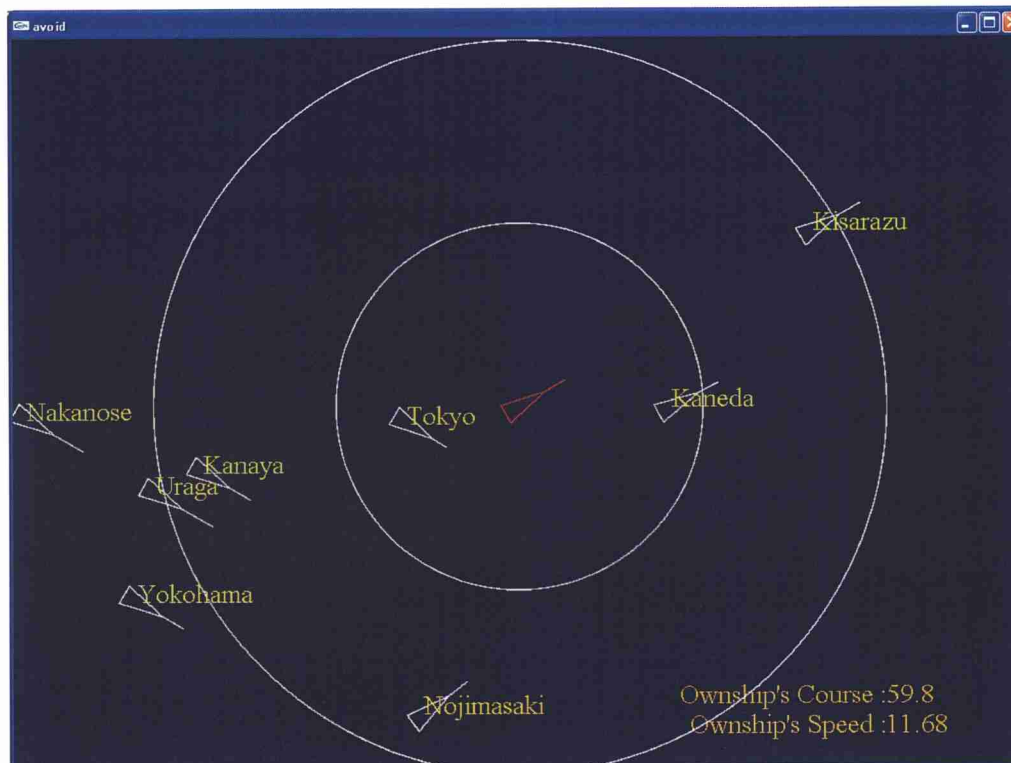


図 3.3 行き先表示

行先表示画面では、図 3.2 に示した基本画面で表示された他船を表すシンボル近傍に他船の行き先を付加して表示するものである。この図で表示されたように他船の行き先は、英数字によって表される。

(2) 変針点表示

この表示は行先表示の場合と同様に他船の将来動向を推定する上で推定精度を高めるものと考えられる。行先とともに変針点表示を他船動向に重畳することによって、他船の将来動向を確定的なものとする事ができるものと考えた。

この行先表示と変針点表示により、他船動向はほぼ、確定できると考えられる。また、表示された変針点間を線分で結ぶことにより、過去から将来にわたる他船動向が明確になるため、DCPA、最小航過距離等の割り出しが容易になることが考えられる。

さらにこの表示により表示がない場合に比べ、他船の動向に依存した避航操船をなくすることができるものと考えられる。

変針点表示画面を図 3.4 に示す。

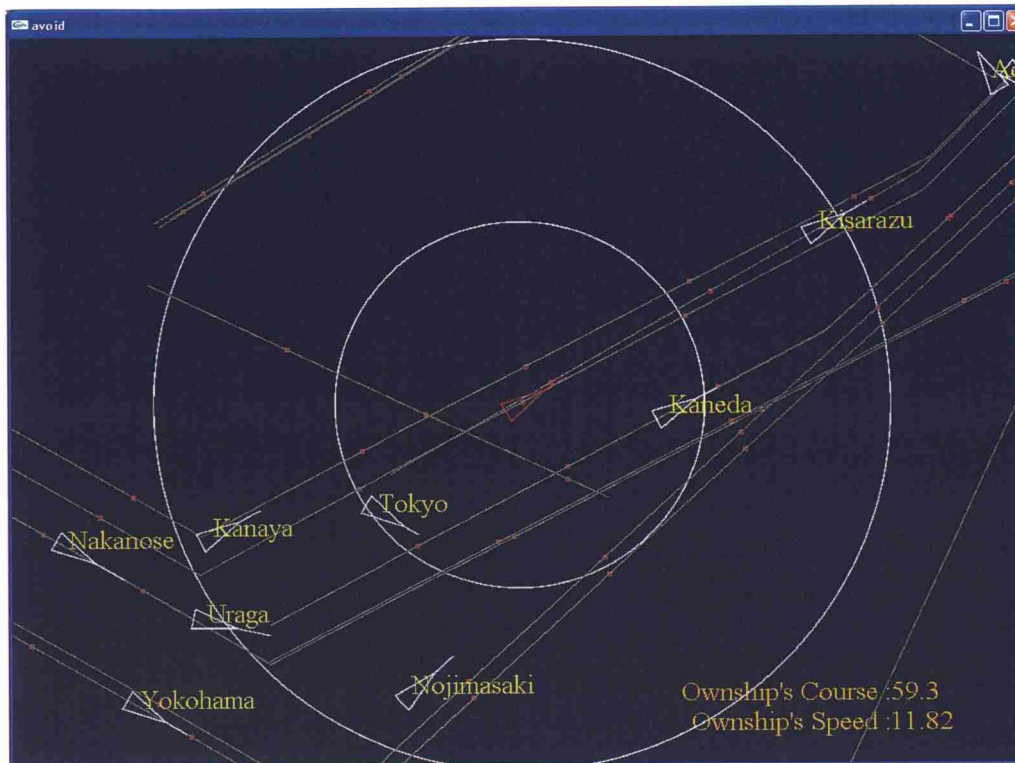


図 3.4 行き先表示+変針点表示

本表示において、操船の利便性を考慮し、計画変針点を結んだ計画航路上にタイムスケール表示を選択的に表示させる機能を有する。このタイムスケールは、予め時間間隔を変えて操船時、任意に選択可能である。

また、他船は常に計画変針点を結んだ計画航路上を航行することを前提とした。

(3) 他船動向の確定化表示による効果の予測

他船動向を確定化することは操船者の情報処理の情報解析・意思決定フェーズにおいて以下に示す効果を与えるものと期待できる。

- ・ 他船動向が早い時期に確定化できるため情報解析および意思決定フェーズにおける他船行動の予測精度が高まる。つまり、正確な他船動向解析とそれに基づく、正確な他船動向の予測が期待できる。
- ・ 正確な他船動向解析と予測により、正確な避航計画が立案できる。この結果、操船者は確実に安全に避航することが可能となる。
- ・ 他船動向を確定情報とすることは、他船動向に関する情報量が増加することである。しかし、操船者に対する支援表示の効果によって情報量が増加しながら、実

際の情報処理時間は減少することが予想できる。

本研究で考案した表示において、行先表示の場合は表示が何もない場合に比べ、当該他船の行先が明らかとなることから、今後の行動がある程度予測可能となる。しかし、当該他船が目的地に至る経路についての正確な予測は困難となることが予想される。また、行先表示と変針点を表示する場合、当該他船の目的地と目的地に至る経路の両方が明らかとなる。したがって、表示が何もない場合に比べて、他船動向に関する情報は増加するとともに、予測精度についても向上することが期待できる。

3.3.2. 行き先と変針点情報表示による操船者支援実験

(1) 実験目的

既述したように他船動向が不確実であることは、操船者の情報解析・意思決定の精度を悪化させる要因となる。したがって、他船動向を確定事象とすることが操船者の情報解析・意思決定における支援と考えることができる。

本実験では、前節で提案した他船動向を確定化させる情報表示が操船者の情報処理能力にどのような影響を与えるかを調べることにする。

(2) 実験条件

実験条件について以下に記す。

- ・ 供試船
自船は 200m コンテナ船とし、他船は任意とした。
- ・ 被験者
被験者は熟練した船長・航海士数名で実施した。
- ・ 海域
シナリオ選定にあたり、対象海域によって海域の特殊性から他船動向が一定のパターンを成すことを考慮に入れ、次のように対象海域を選定した。
 - (ア) 航路航行が義務付けられているが、自・他船ともに一定の操船の自由が認められている海域。このような海域では、自・他船ともに針路および行先がほぼ、特定できる。本研究では、シンガポール海峡を対象とした。
 - (イ) 航路の出入り口に近い航路外の海域で、航路へ出入りするために一定の拘束条件は有するものの、基本的にどのような針路、行先を有する他船が存在しても不合理性はない海域。本研究では東京湾浦賀水道航路南口を対象とした。
- ・ その他

被験者に対して他船動向は基本的には不確定である旨を伝えておく。この意図は、過去他船動向の観測から推定した他船の将来動向が必ずしも実際とは合致しないことを周知するためである。

さらに被験者に対して、操船動作を行わず、初期設定のまま続行する時には、その旨、報告し、その時の経過時間を計測した。

(3) 実験内容

他船動向の不確定性は次に示すパターンで表されるものと考えた。

左右横切り、反航、追い越し船がそれぞれ、今まで航行していた針路から右・左転および直進する。避航操船では操船者は、他船の動きに対応して操船することになる。ここで、他船動向の不確定性を次のように表すこととした。

すなわち、他船は進行方向に対して、今後、①直進、②右転、③左転する可能性がある。操船者は現時点までの当該他船の動向から判断して、爾後の他船動向を線形補間することで推測する場合が多い。

ここで、他船が自船に接近するよう針路を転じる場合には、直進する場合に比べ、TCPA、DCPA が減少し、衝突の可能性も増加する。

逆に他船が自船とは離れるように針路を転ずる場合は他船が直進する場合に比べ、TCPA、DCPA は大きくなり、衝突の可能性は減少する。

さらに、他船が直進する場合は当初の推測どおりとなる。

これらのことから、他船が転ずる針路の方向によって避航する上での自船の操船の困難度が規定できる。

本研究では他船が自船の側に針路を転ずる場合を操船困難度「高」とし、以後、簡単のために単にレベル1と称する。また、他船が同一針路で直進する場合を操船困難度「中」とし、同様にレベル2と称する。さらに、他船が針路を自船から離れるように転じる場合を操船困難度「低」とし、同様にレベル3と称することにする。

これらの操船困難度を考慮して、次の各シナリオを「支援表示なし」、「行先表示」、「行先表示+変針点表示」の3ケースについて操船シミュレータによる実験を行った。

また、以下の各シナリオにおいてレベル毎の他船の動きについては操船者には説明しない。さらに、連続で実験を行う際にシナリオ、レベルは順不同で行った。

ア. シナリオ1

他船が自船の右舷からの横切り船の場合。シナリオ1の概念図を図3.5に示す。

① レベル1

他船が針路を左に転ずる。

② レベル2

他船の針路は不変。

③ レベル3

他船が針路を右に転ずる。

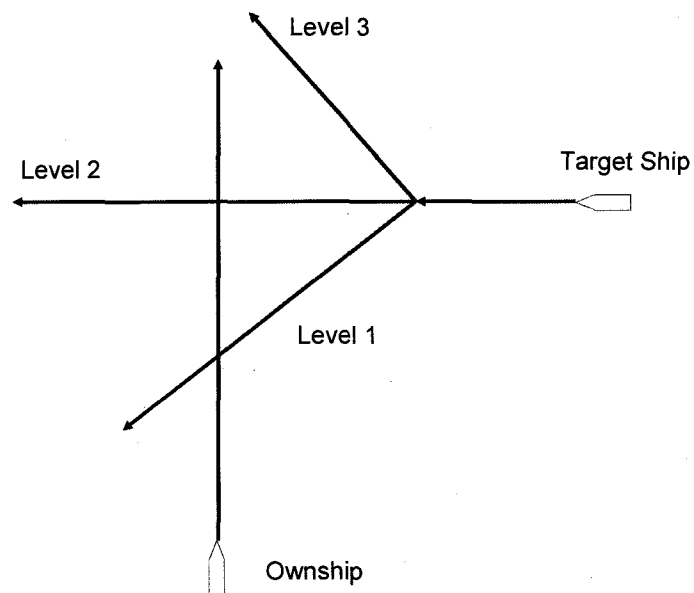


図 3.5 シナリオ 1 概念図

イ. シナリオ 3

他船が右舷前方よりの反航船の場合。シナリオ 3 の概念図を図 3.6 に示す。

- ① レベル 1
他船が自船針路を横切るように針路を左に転ずる。
- ② レベル 2
他船が針路を変えない。
- ③ レベル 3
他船が針路を右に転ずる。

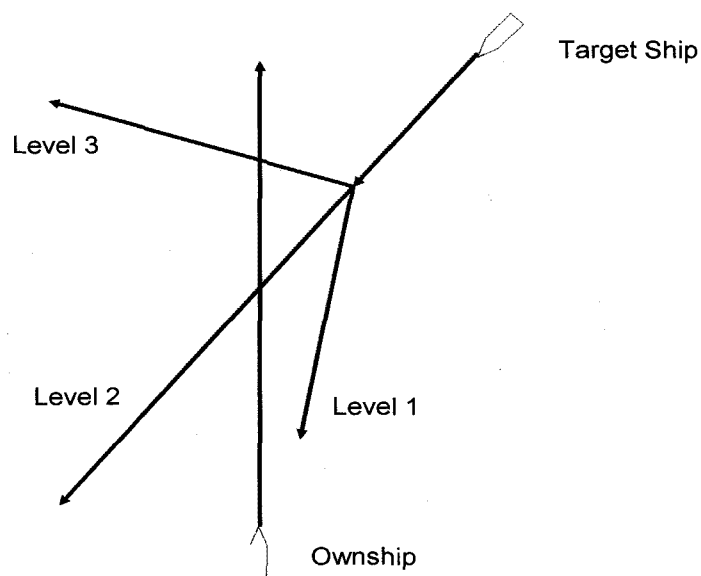


図 3.6 シナリオ 3 概念図

ウ. シナリオ 5

他船が右舷前方の速力の速い同航船の場合。シナリオ 5 の概念図を図 3.7 に示す。

- ① レベル 1
他船が自船を追い越してから針路を左に転ずる。
- ② レベル 2
他船の針路が不変。
- ③ レベル 3
他船が自船を追い越してから針路を右に転ずる。

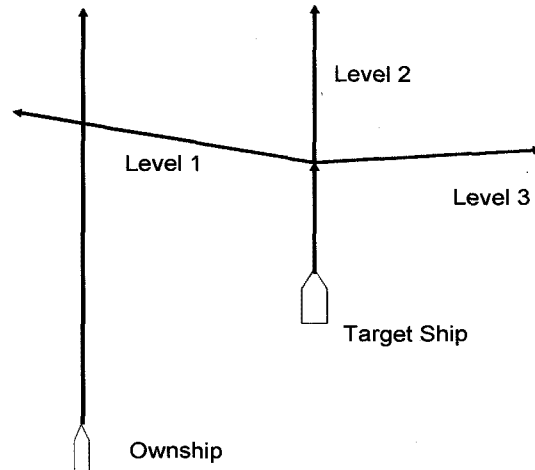


図 3.7 シナリオ 5 概念図

エ. シナリオ 6

他船が左舷前方の速力の速い同航船の場合。シナリオ 6 の概念図を図 3.8 に示す。

- ① レベル 1
他船が自船を追い越してから針路を右に転ずる。
- ② レベル 2
他船の針路が不変。
- ③ レベル 3
他船が自船を追い越してから針路を左に転ずる。

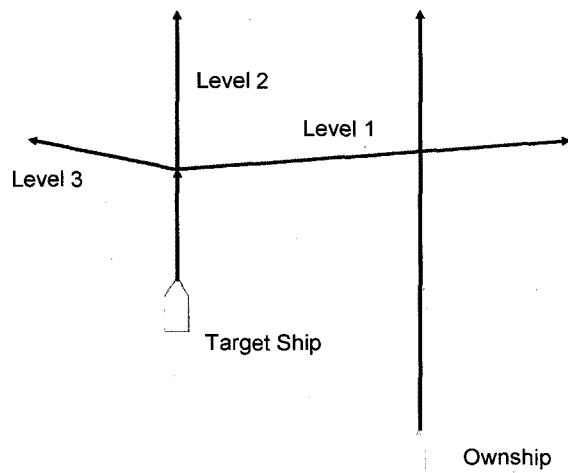


図 3.8 シナリオ 6 概念図

(4) 実験海域とシナリオ

実験海域は、シンガポール海峡と東京湾口とした。表 3.1 に海域とシナリオの対応を示す。

表 3.1 実験海域シナリオ対応

No.	シンガポール海峡	東京湾口
1	○	○
3		○
5	○	
6		○

シンガポール海峡では、東航および西航の航路帯が決められている。また、浦賀水道航路等において禁止されているような航路の横断には、制限がない。また、シンガポール海峡の横断する船舶の数は多いことが特徴である。さらに、東行きの航路帯の中央部分には喫水が深い大型船用の専用航路が設定されている。また、左舷からの横切り船については、当該横切り船が避航船であり、自船は保持船となる関係上、シナリオの中には含まなかった。これは、東京湾口シナリオについても同様である。

以上のような特徴から、シナリオ 1（右舷からの横切り）とシナリオ 5（右舷同航）を設定した。

また、東京湾口シナリオについては、浦賀水道航路から出る船舶、同航路に入る船舶についてはある程度の拘束力を与えることができる上、東京湾口近辺の港へ入港する船舶、東京湾口をかすめて行き去る船舶等の設定が自由に行えることから、シナリオ 1、シナリオ 3（右からの反航）、シナリオ 6（左舷同航）を設定した。

3.3.3. 行き先と変針点情報表示による操船者支援実験結果

本実験の結果を支援表示なし、行先表示、行先＋変針点表示について以下に示すようにまとめた。

3.3.3.1. 航跡図

支援表示なし、行先表示、行先＋変針点表示の場合の自・他船の航跡を任意の操船者の記録から抜粋して示す。なお、これ以降、簡単のため各シナリオを次のように略記する。なお、ここで S1 はシナリオ 1 を、L1 はレベル 1 を示す。（以下、同様）

シンガポール海峡・シナリオ 1： S1L1、S1L2、S1L3

シンガポール海峡・シナリオ 5： S5L1、S5L2、S5L3

東京湾口・シナリオ 1： T1L1、T1L2、T1L3

東京湾口・シナリオ 3： T3L1、T3L2、T3L3

東京湾口・シナリオ 6： T6L1、T6L2、T6L3

(1) シンガポール海峡

ア. シナリオ 1

シナリオ 1 について、支援表示なし、行先表示、行先+変針点表示の航跡図をそれぞれ図 3.9 に示す。

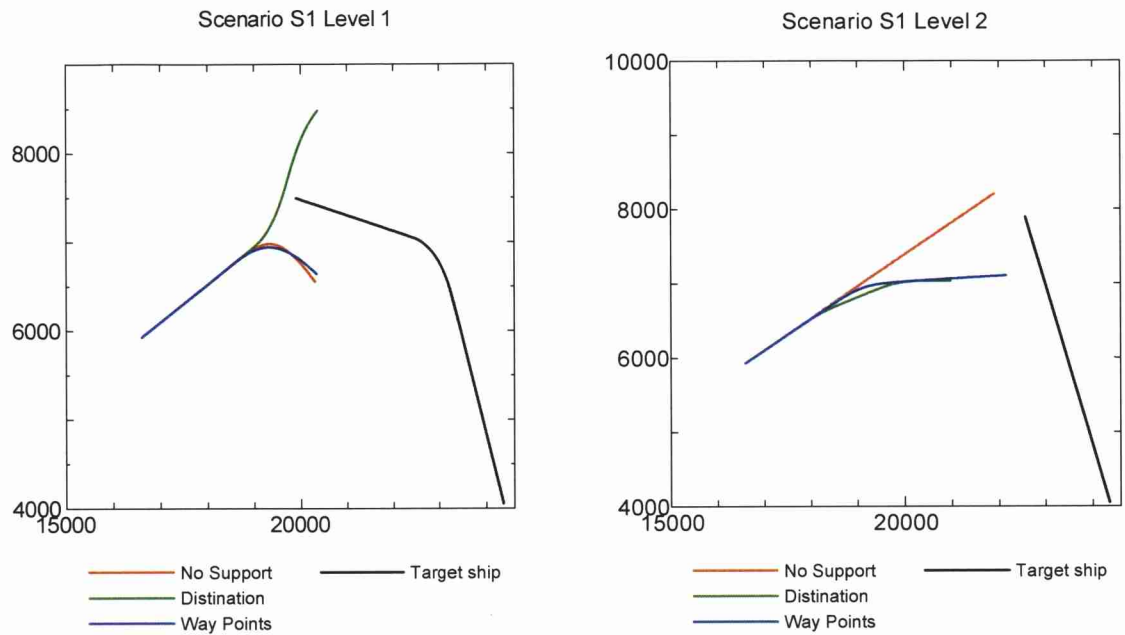


図 3.9 シナリオ 1 航跡図

イ. シナリオ 5

シナリオ 5 について、支援表示なし、行先表示、行先+変針点表示の航跡図を図 3.10 に示す。

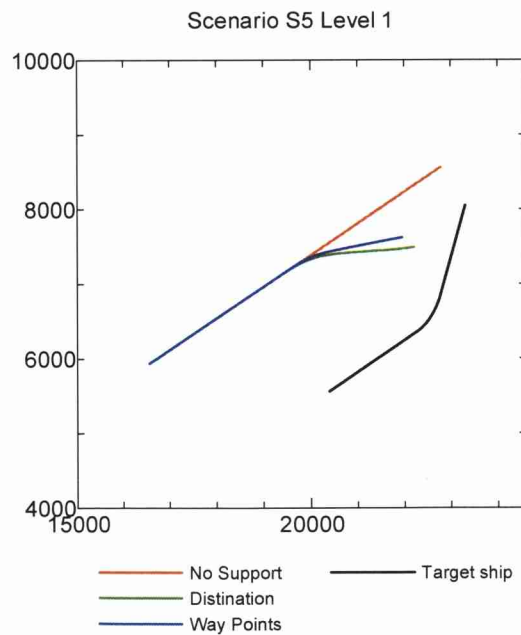


図 3.10 シナリオ 5 航跡図

(2) 東京湾口

ア. シナリオ 1

シナリオ 1 について、支援表示なし、行先表示、行先 + 変針点表示の航跡図を図 3.11 に示す。

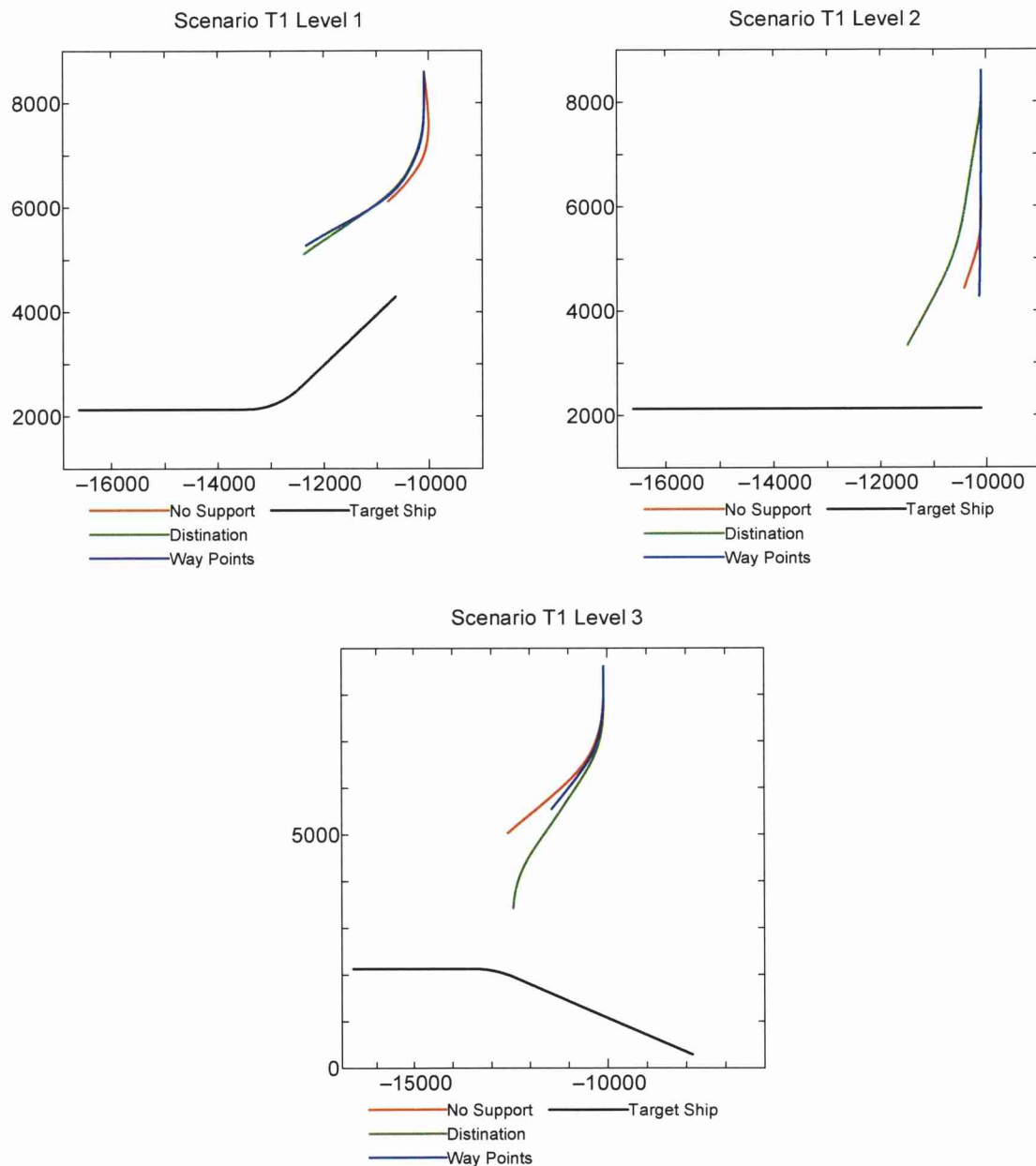


図 3.11 シナリオ 1 航跡図

イ. シナリオ 3

シナリオ 3 について、支援表示なし、行先表示、行先 + 変針点表示の航跡図を図 3.12 に示す。

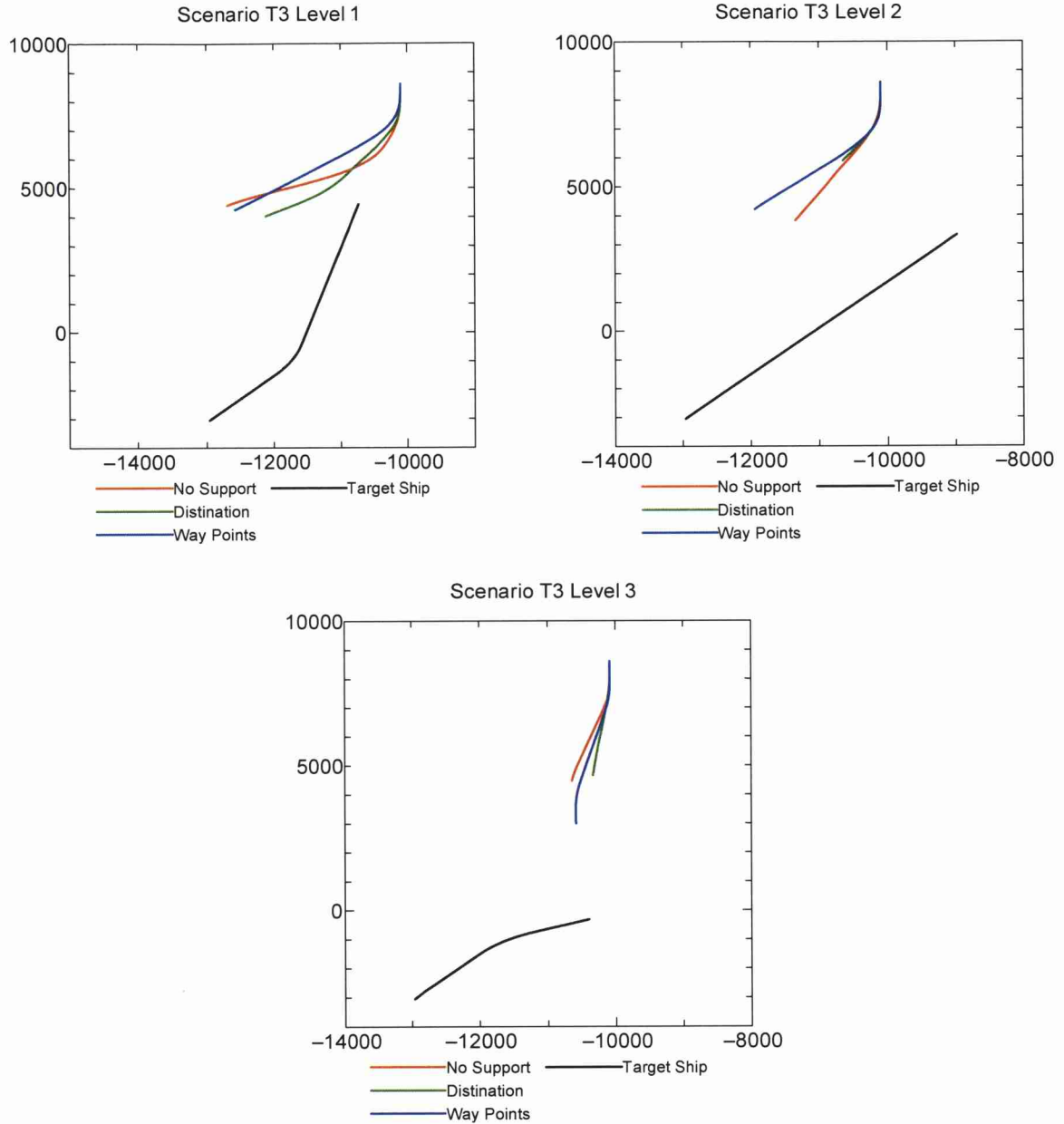


図 3.12 シナリオ 3 航跡図

3.3.3.2. 他船動向による操船への影響

操船者は他船動向によって、避航のための操船動作が左右されることになる。ここで、実験結果から他船動向が操船者に与える影響を求めた。

操船者が他船を避航するために採った操船動作の開始時間を $T_A(s)$ とし、当該他船の変針開始時間を $T_S(s)$ とした時、他船動向に対する操船者の影響を他船動向依存時間 T_D と呼ぶことにすると、他船動向依存時間 T_D は次の式で表される。

$$T_D = \sum |T_A - T_S| \quad (2.27)$$

式(2.27)において、避航のための操船動作には操舵と主機操縦がある。つまり、他船

を避航するために採った操船動作の各開始時間を他船の変針開始時間を基準とした経過時間の絶対値の総和の大小によって、他船動向が避航操船に与える影響を判断するものである。

操船シミュレータ実験から各シナリオに応じて他船動向依存時間を求めた。シンガポール海峡シナリオにおける結果を表 3.2 に示す。また、東京湾口シナリオによる結果を表 3.3 に示す。

表 3.2 シンガポール海峡シナリオにおける他船動向依存時間

	No. Supp	Dist.	Way		No. Supp	Dist.	Way
S1L1	316.5	151.5	127	S5L1	0	0	0
S1L2	0	0	0	S5L2	0	0	0
S1L3	0	0	0	S5L3	0	0	0

表 3.3 東京湾口シナリオにおける他船動向依存時間

	No. Supp	Dist.	Way		No. Supp	Dist.	Way
T1L1	546.5	460.5	387	T3L1	272	436	194.5
T1L2	231	91	26	T3L2	86.5	104	110
T1L3	281	243.5	130.5	T3L3	137	111.5	98.5

	No. Supp	Dist.	Way
T6L1	448.5	445	355
T6L2	32	0	0
T6L3	232.5	0	0

さらに、これらの関係を図示したのが、以下の図 3.13～図 3.17 である。

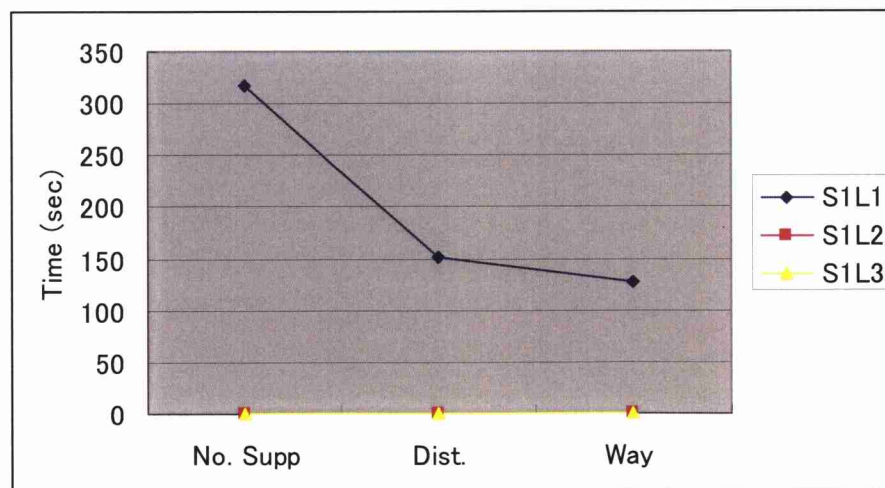


図 3.13 シンガポール・シナリオ 1

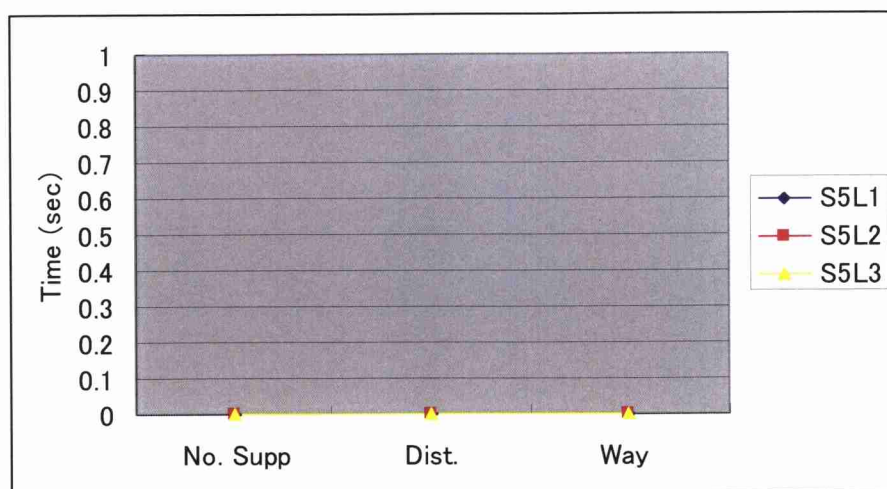


図 3.14 シンガポール・シナリオ 5

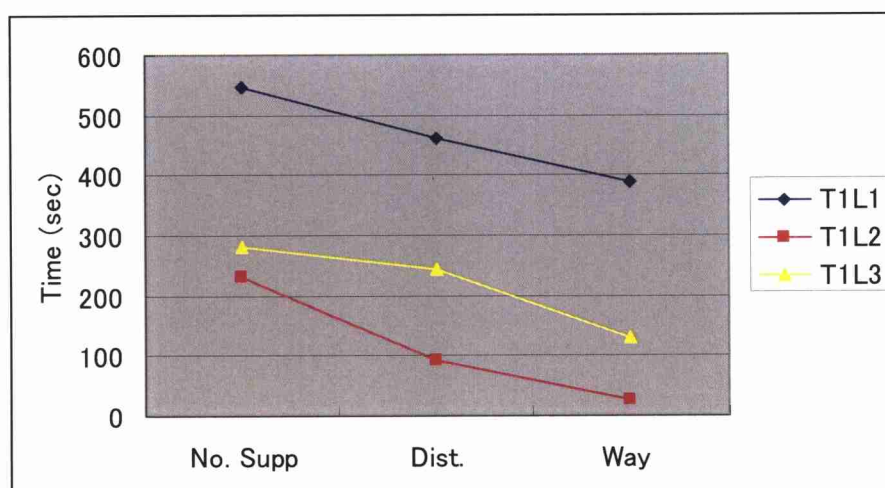


図 3.15 東京湾・シナリオ 1

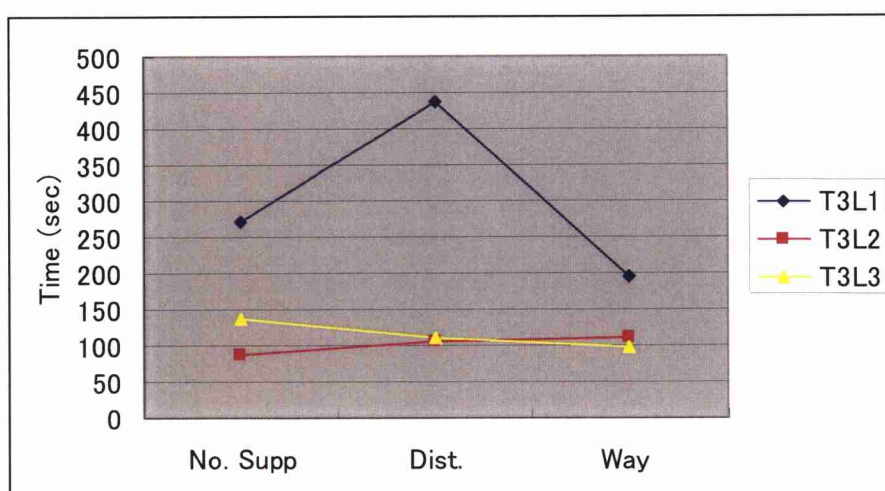


図 3.16 東京湾・シナリオ 3

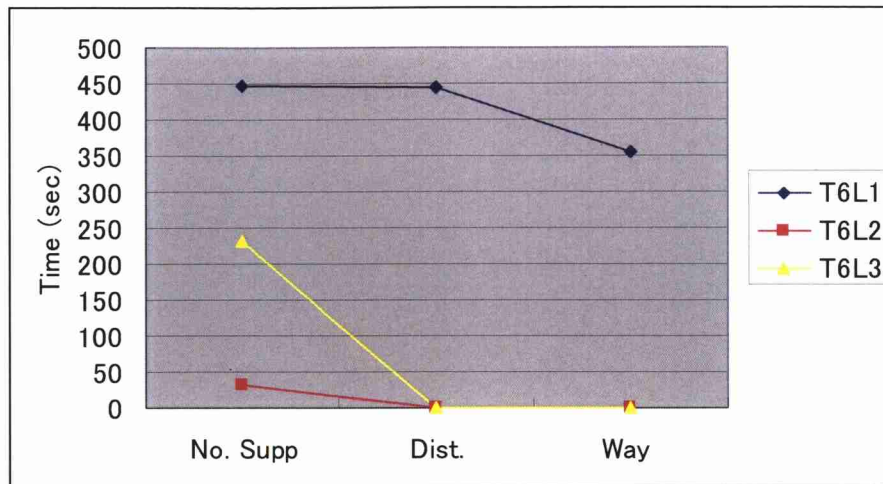


図 3.17 東京湾・シナリオ 6

支援表示なしと変針点表示の場合の他船動向依存時間についてこれらの図からわかる比較結果をレベル毎に示す。ここで、シンガポール・シナリオ S5 においては避航動作が行われなかったことから、以降の考察から除外することとする。

(1) 操船困難度の設定

シンガポール・シナリオ S1 を除き、東京湾シナリオにおいて、他船動向依存時間はレベル 1、レベル 3、レベル 2 の順に減少している。これは、他船動向に対する依存程度がレベル 2、レベル 3、レベル 1 の順に大きい、すなわち、避航操船において不確定な他船動向に依存する程度がこの順番に大きいことを表している。

この理由として、避航対象の他船が針路を変更しない場合には、その将来動向は観測データから線形補間することで容易に推測することができるのに対し、当該他船が自船側に変針する場合も、自船から離れるように変針する場合も将来動向の推測が困難となることから、他船の実際の動向の観察が必要となるため、他船動向依存時間は大きくなっていることが考えられる。さらに、当該他船が自船に接近するように変針した場合には詳細な他船動向の観察が必要となることから、レベル 1 の他船動向依存時間が最大となり、次に自船から離れるように変針した場合が続くものと考えられる。

(2) レベル 1

シナリオ T3 を除き、支援表示なし、行先表示、変針点表示の順に他船動向依存時間は減少傾向が認められる。この理由を示す。

レベル 1 では他船は途中から自船の方に向かって針路を変更してくる。支援表示がない場合、操船者は当該他船が横切り船であることを確認した時点で、避航のための操舵を行うが、その後の急な変針を予期していない。このため、当該他船が針路を転じるまで、当初、観測した針路、速力のまま航行することを前提に避航計画を立案し、その計画の実行にかかる。そこで、当該他船の急な針路変更を認めてから対応動作を取るために追加の操舵を行うことになる。

一方、行先表示がある場合は、横切り船の発見と同時に当該他船の行先が示されるため、行き先表示から他船の計画針路を推定することができる。したがって、推定した他船の計画針路をもとに自船の避航計画を立案・実行しながら、他船動向の推定精度を高めるために適宜、実際の他船動向の確認・把握を進めることになるため、支援表示なしに比べて他船動向依存時間は減少することになる。

さらに、変針点表示がある場合は、横切り船を発見すると同時に当該他船の計画変針点および針路が示されるため、初めから当該他船の変針を考慮した避航計画を立案することが可能となる。

以上から、支援表示なしに比べ、行先表示、変針点表示の場合の他船動向依存時間は減少することになる。

また、本項の最初で除外したシナリオ T3 について考察する。

シナリオ T3 では、行先表示の他船動向依存時間が支援表示なしおよび変針点表示と比べ顕著に大きくなっている。これは、シナリオ T3 では他船が本船の右斜め前方からの反航船であることを考え合わせると、行先表示があっても他船がどこで変針するかが明確ではないため、他船の実際の動向を確認しながら避航動作を行なう必要があることを示している。

要すれば、このシナリオのように他船が右斜め前方から反航し、しかも、途中で自船に接近するように変針する場合、操船者は他船のアスペクトの変化を捉えきれない。さらに、表示された行先はこの場合、自船後方となるため、操船者にとって明確に把握できないことになる。したがって、このような情報の不足から操船者は他船の動きを後追いで操船動作を行うため、他船動向依存時間は顕著に大きくなるものと考えられる。

(3) レベル 2

東京湾シナリオ T1 においてはレベル 1 と同様に支援表示なし、行先表示、変針点表示の順で他船動向依存時間は減少している。この理由もレベル 1 の時と同様である。

また、同シナリオ T3 においては、支援表示なし、行先表示、変針点表示の順で微増しているが、他船動向依存時間は 100 秒程度でほとんど、等しい。この理由として、他船は途中で変針することなく、一定の針路、速力を保っているため、避航動作開始時点での他船動向観察結果から立案された避航計画に沿った避航動作によって、確実に当該他船を避航することが可能であるためである。つまり、追加の避航動作を実施する必要がないことから、他船動向依存時間は各表示においてほとんど等しいものとなっている。

同シナリオ T6 においては、行先表示と変針点表示の場合の他船動向依存時間は 0 であるが、これはこれらの表示から他船は自船と同航であることが明らかとなったためである。

(4) レベル 3

東京湾シナリオの各シナリオにおいて、レベル 3 では他船動向依存時間は支援表

示なし、行先表示、変針点表示の順に減少している。この他船動向依存時間減少の理由は先にレベル1で示した同様の理由によるものである。

3.3.3.3. DCPA

DCPAは、自船と他船の最接近距離を表すことから、避航操船における操船結果を評価する指標の一つとして利用することができる。

シナリオ、レベル毎に求めたDCPAを表3.4と図3.18～図3.22にそれぞれ示す。また、図3.23～図3.29に他船動向依存時間とDCPAの関係を図示する。ここで、操船動作が行われなかったシンガポール・シナリオS1L2、S1L3およびS5ならびに東京シナリオT6については省略する。なお、以下の図表の中で項目に1、2、3とあるのは、それぞれ、支援表示なし、行先表示、変針点表示を示す。

表 3.4 DCPA

	1	2	3
S1L1	0.3	0.3	0.4
S1L2	1.15	1	0.9
S1L3	1.7	1.7	2.5
S5L1	1.5	1.4	1.35
S5L2	0.95	1	1
S5L3	1.8	1.75	1.75
T1L1	0.85	0.95	1
T1L2	1.5	1.2	1.4
T1L3	1.95	1.35	1.9
T3L1	0.65	0.4	0.8
T3L2	1	0.85	1
T3L3	1.95	2.05	1.85
T6L1	0.8	0.8	0.8
T6L2	0.85	0.8	0.8
T6L3	1	0.85	0.7

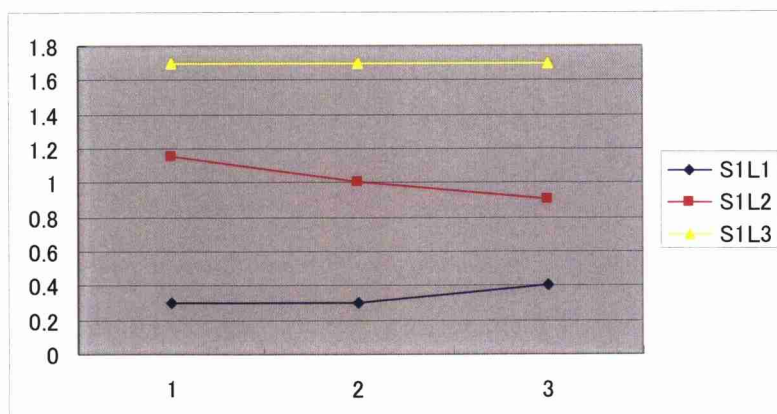


図 3.18 シンガポール海峡シナリオ1

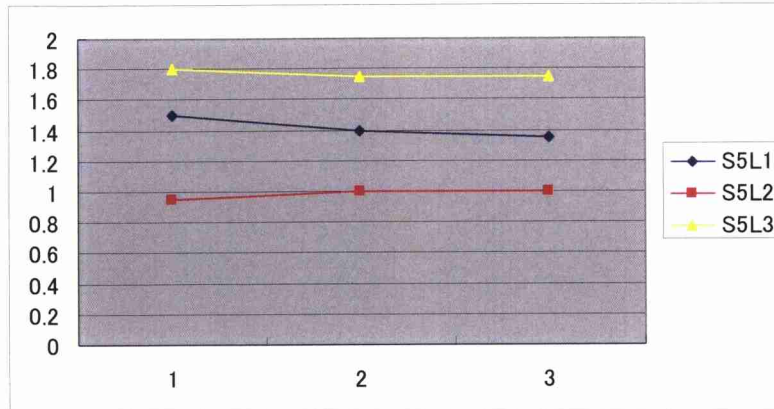


図 3.19 シンガポール海峡シナリオ 5

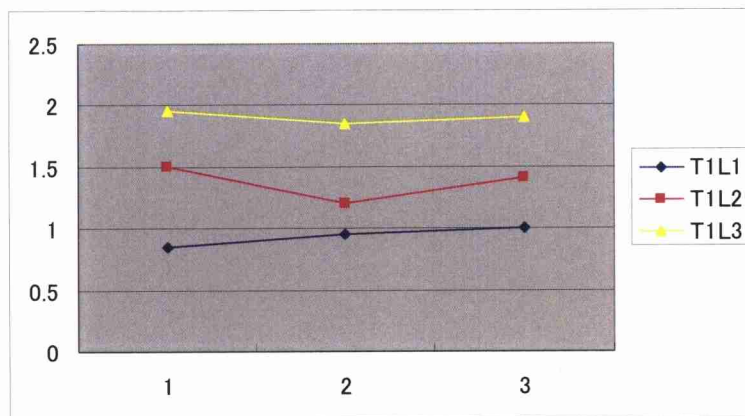


図 3.20 東京湾口シナリオ 1

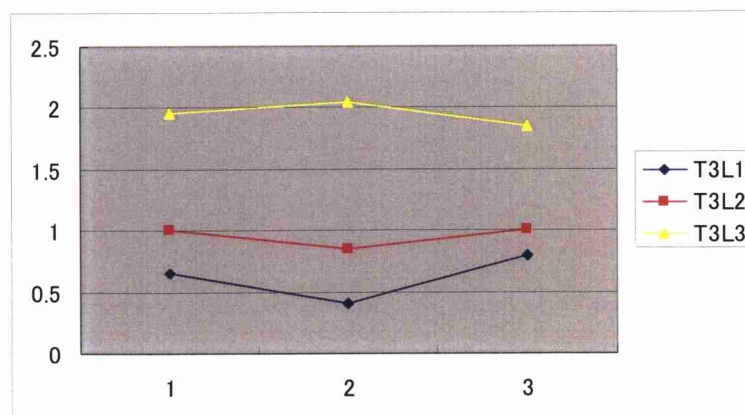


図 3.21 東京湾口シナリオ 3

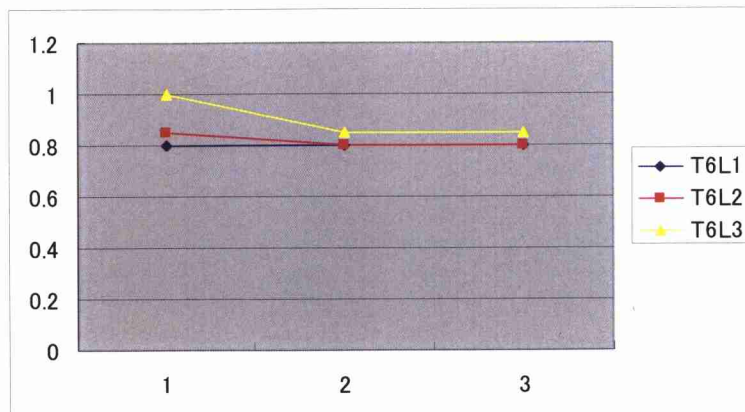


図 3.22 東京湾口シナリオ 6

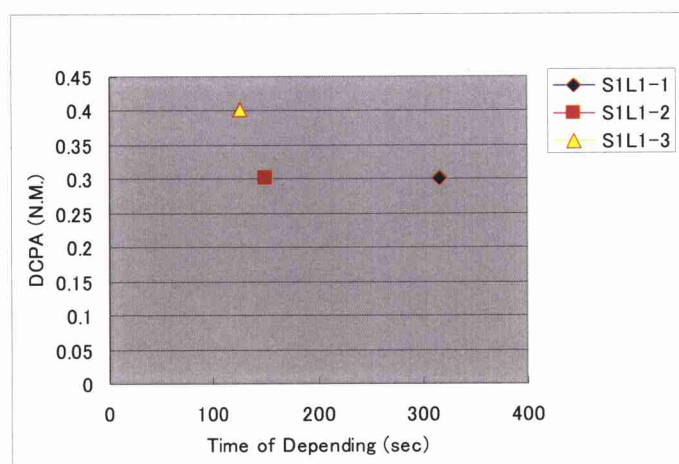


図 3.23 シンガポール海峡シナリオ 1・レベル 1

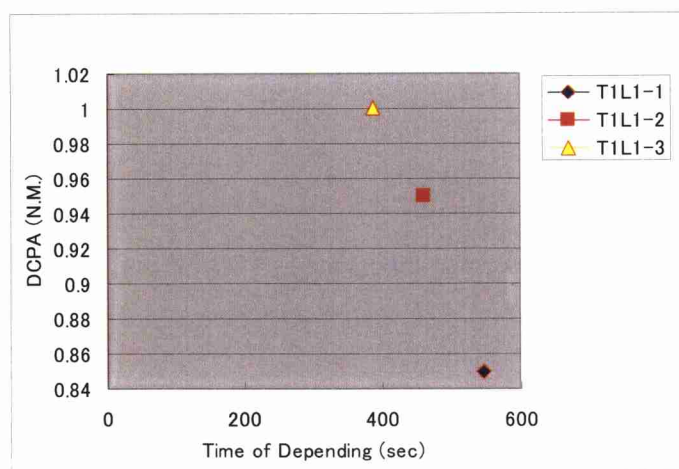


図 3.24 東京湾口シナリオ 1・レベル 1

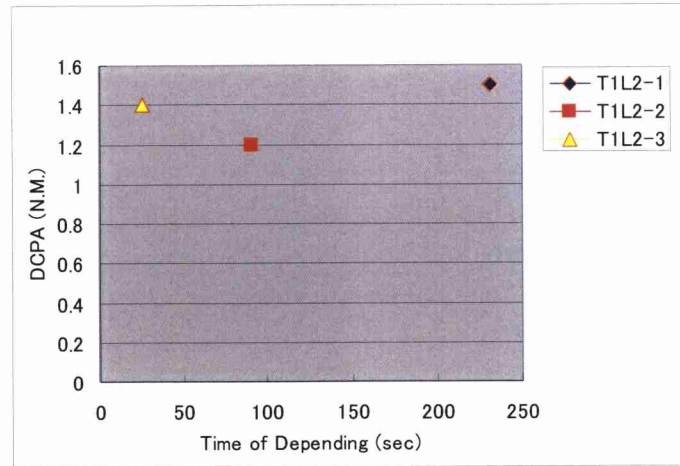


図 3.25 東京湾口シナリオ 1・レベル 2

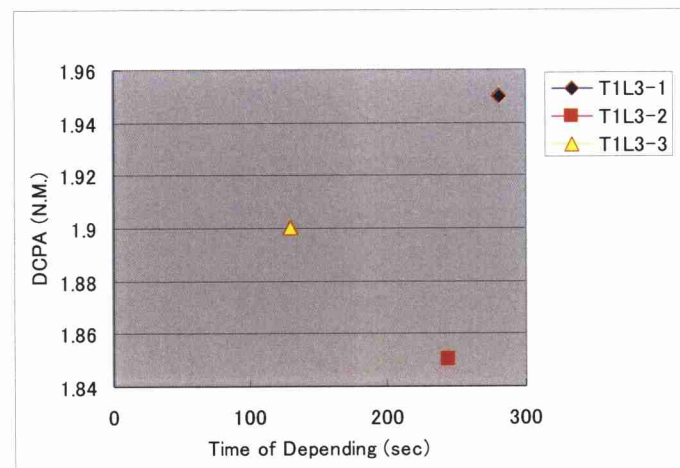


図 3.26 東京湾口シナリオ 1・レベル 3

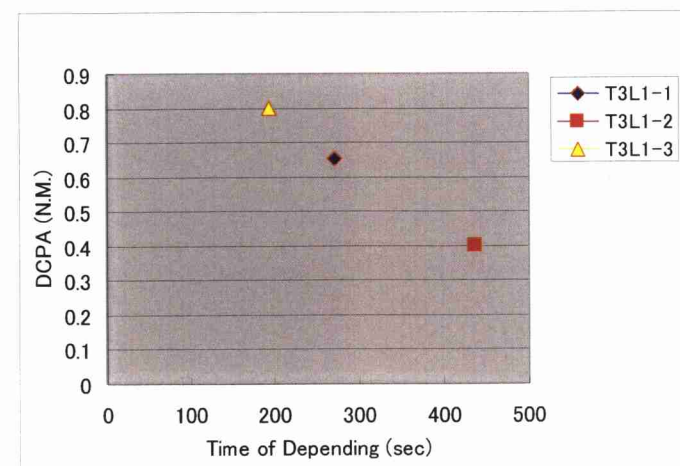


図 3.27 東京湾口シナリオ 3・レベル 1

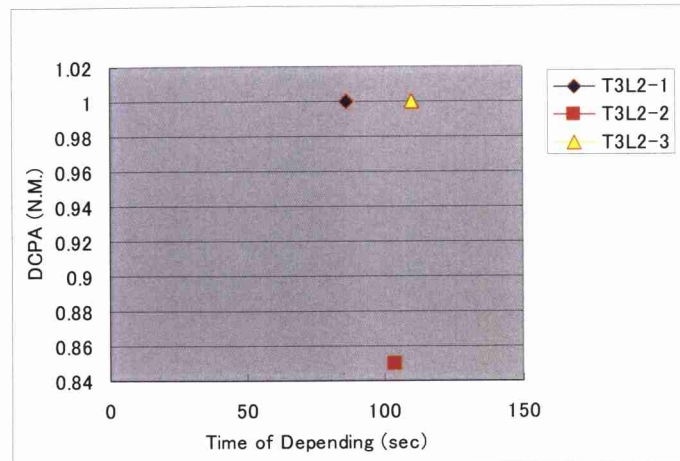


図 3.28 東京湾口シナリオ 3・レベル 2

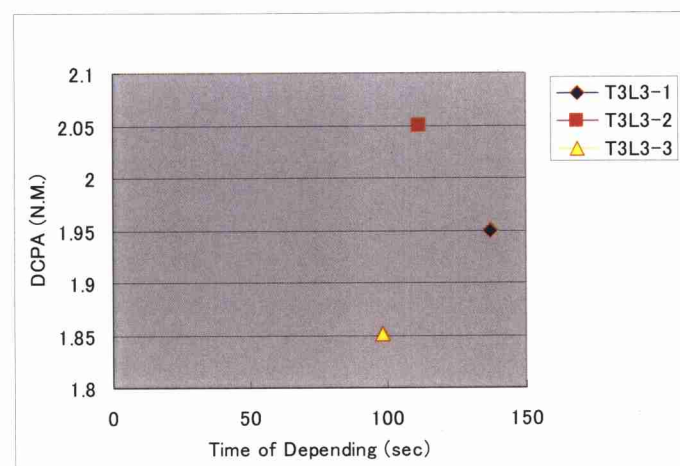


図 3.29 東京湾口シナリオ 3・レベル 3

これらの図表から、以下が明らかとなった。

(1) レベル 1

シンガポール・シナリオ S5 を除き、レベル 1 における DCPA はレベル間で最小となっている。これは、レベル 1 は他船が自船に接近してくる設定のため、DCPA は最小となったと考えられる。

また、他船動向依存時間が大きい場合 DCPA は小さく、他船動向依存時間が小さい場合 DCPA は大きくなる傾向があるが、これらの差は僅少となっており、各表示における DCPA はほぼ、一定と見なすことができる。

他船動向依存時間が大きいことは自船の避航が他船動向に大きく左右されていることであり、自船の避航計画に沿った避航が行えないことから DCPA は小さくなっていると考えられる。他方、他船動向依存時間が小さいことは自船の避航における他船動向による影響が小さいことを意味しており、自船の避航計画に沿って避航が行え

るため、DCPA は大きくなっていると考えられる。

(2) レベル 2

表示間の他船動向依存時間の増減に関わらず、DCPA はほぼ、一定となっている。レベル 2 の場合は、支援表示の有無に関わらず、他船の針路・速力は一定であるため、どの表示の場合においても自船の避航計画の差異はごく小さなものとなっていることが考えられる。したがって、他船動向依存時間の増減とは無関係に DCPA は各表示において、ほぼ、一定となる。

(3) レベル 3

各表示における他船動向依存時間の大小に関わらず、DCPA はほぼ、一定である。DCPA が一定値を示しているのは、どの場合においても他船が自船から離れるように変針する時点が一定であることが理由となる。

3.3.3.4. 実験結果のまとめ

他船動向が操船者の避航操船に与える影響を表す指標として、他船動向依存時間を考案して、操船シミュレータ実験による結果からこの依存時間の大小による各表示の相違と操船結果を表す指標のひとつである DCPA に着目した。

実験をまとめると次のようになる。

- (1) 支援表示なしの場合、他船動向依存時間は大きく、以下、行先表示、変針点表示の順に減少する。
- (2) 他船動向依存時間が小さい行先表示、変針点表示の場合においても DCPA は支援表示と比較して減少することはない。
- (3) 他船が反航・横切り状態で針路の途中から自船に接近するように変針する場合、操船者は当該他船の針路変化を確認することが困難である。この場合、変針点表示は他船動向への依存は小さいが、行先表示では支援表示なしよりも依存の程度は大きい。
- (4) 他船が横切り状態で針路を途中で変更しない場合、行先表示、変針点表示とも支援表示なしの場合と同程度、他船動向に依存して避航動作を行う。

これらをまとめると、本研究で考案した変針点表示によって、不確定な他船動向に操船者の避航動作が依存する程度が減少するが、操船結果が低下することはないことが明らかとなった。これは、換言すれば本研究で考案した変針点表示によって、操船者の情報解析・意思決定が支援され得ることを示している。

3.3.4. 輻輳状態への適用

実際の操船場面では船舶通航は輻輳している場合が多く、避航を行う場合においても、同時に複数の他船を対象とすることが一般的である。したがって、複数他船を対象とし

た場合の避航操船に本研究で考案した表示を利用した場合、操船者の情報処理について考察する。

(1) 情報収集過程

他船動向確定化情報の表示による操船シミュレータ実験により、他船動向が確定されることで操船者の解析・意思決定に対する支援効果が得られることが示されたが、情報収集過程においても他船動向を確定化できる表示は有用であると考えられる。

本章で先に示したとおり、輻輳状態のような場合において操船者が情報収集を行う対象となる他船の隻数が増加することは、操船者の情報収集能力の限界を超過することを招来する。そして、操船者が処理できない情報が増加することにつながる。

ここにおいて、操船者の情報収集能力が改善されるならば、輻輳状態における操船者の能力の限界は引き上げられることになり、処理不能な情報は減少することになる。

情報収集過程において最も困難なのは、他船動向を短時間に見極め、当該他船の爾後の行動が自船とどのように関係してくるかを予想することである。したがって、他船動向を確定化することができる情報があることで、他船動向予測と自船との関係把握が容易になることが考えられる。

(2) 情報解析・意思決定過程

他船が複数の場合、その全ての動向が確定できることになる。操船者はこの表示により、これら複数他船の中から自船に対する影響度の優先順位付けを行い、最も自船の航行に影響の高い他船から順に避航するような避航計画を作成することができるようになることが考えられる。

たとえば、このような優先付けは本実験の結果から、レベル 1（自船に接近してくる船舶）、レベル 3（自船から遠ざかる船舶）、レベル 2（自船針路を横切る船舶）のように行えることが考えられる。

また、これらの他船に対して予め設定した DCPA を確保することができるような避航計画を作成することも可能となる。

(3) 情報処理全般

上記（1）および（2）において記述したように、本研究で考案した表示では操船者の情報処理能力について支援となり得ることが予想できる。

すなわち、変針点表示では情報収集、解析・意思決定の全ての過程について利用することができることを示した訳であるが、このことは換言すれば、操船者は変針点表示によって、輻輳状態における情報収集、情報解析・意思決定を行うことができることになる。

したがって、本研究で考案した変針点表示により操船者の情報処理能力を支援することが可能であると考えられる。

3.4. 本章のまとめ

操船者の避航操船における操船行動は人間の情報処理行動として捉えることができる。このような情報処理は、情報収集、情報解析・意思決定、行動の各過程として表される。

幅狭海域における避航操船は操船者に多大な負荷を与えることになるが、操船者に影響を与える負荷要因としては、複数の見合い関係の発生、他船動向の不確定性および航行海域の制限が挙げられる。複数の見合い関係の発生は、情報収集能力に、他船動向の不確実性は情報解析および意思決定に、そして、航行海域の制限は行動にそれぞれ、影響を与える。

そして、このような負荷要因の発生によって、操船者の情報処理は限界となることが多いと考えられる。

したがって、操船者に対するこのような能力の限界を支援することを考えた。本研究では、特に他船動向の不確定性に焦点を当てて検討した。

すなわち、他船動向を確定化する情報表示を考案した。この情報表示は操船者の情報解析・意思決定を支援するものである。このような情報表示は、他船の行き先を表示するものとそれに他船の予定変針点を表示するものの2種類を考案した。この表示を使用して、操船シミュレータ実験を行い、不確定な他船動向が操船者に与える影響を調べた。

他船動向が操船者の避航動作に与える影響として、他船動向依存時間を導入した。他船動向依存時間は避航操船において操船者の採った操舵と主機操作の開始時間から当該他船の変針開始時間を差し引いたものの総和として表される。

また、操船シミュレータ実験では実際の海域での独自性を考慮するとともに他船動向の不確定性を3つのパターンに区分し、自船に脅威となる順に操船困難度レベル1～3とした。

操船シミュレータ実験による結果から、他船動向依存時間は支援表示なし、行先表示、変針点表示の順に減少するが、操船結果を表す指標のひとつであるDCPAは表示の有無と他船動向依存時間の大小に係わらず、ほとんど一定であることが示された。

さらに、他船が反航・横切り状態で途中から自船に接近するように変針する場合には行先表示では他船動向依存時間は支援表示なしよりも顕著に大きくなることが示された。この理由として他船のアスペクト角がリアルタイムかつダイナミックに変化するため、他船動向に依存する程度は大きくなるものと考えられる。

これらの実験結果から本研究で考案した支援表示によって、不確定な他船動向に依存する程度が減少するとともに、操船結果も良好となることが示され、操船者の避航操船における情報解析・意思決定に有効であることが示された。

さらに、本実験で示された結果から幅狭状態の操船者支援として変針点表示を利用することで、情報収集、情報解析、意思決定の各過程に共通して利用できる可能性を示した。

4. 結言

本研究では様々な操船場面の中から最も基本的な航路航行操船と避航操船に焦点を当てて、操船者に対する支援方法を明らかにした。

まず、航路航行操船においては制御的な観点から操船者の本来有する適応制御特性を効果的に利用することで操船者特性の改善を行った。操船者に対して船体制御に関わる状態変数を表示することによって操船者の適応制御特性を利用した操船者特性の改善を行うことが可能となった。この表示によって、操船者は船体操縦性能を極限まで利用した船体制御を行うことが可能となる。したがって、状態変数表示によって操船者は従来では困難であった精度の高い航路追従についても実現できることが考えられる。

また、避航操船においては操船者の頭脳活動の観点から情報処理における負荷要因の軽減を目指した。特に情報解析と意思決定における操船者の高負荷状態を軽減するために他船動向を確定化することは、操船者の避航操船における情報処理能力を向上させることが可能となることが示された。他船動向を確定化するための方法の一つとして AIS の利用が考えられる。

ここで示した他船動向の確定化するための情報として AIS の仕様ではオプションとして変針点情報がある。本研究での成果はこのような AIS オプションの利用法について一つの指針を示すものとなる。

本研究によって、操船支援機器開発には制御の中心となる操船者の避航操船支援に対する人間特性の斟酌が必要であることが示された。今後の移動体制御を考える場合、制御器として人間をはずすことはできない。

したがって、ここで実施した研究によって、操船者を制御の中心とおいた人間—操船系における新しい制御方法と人間に対する支援方法を示すことができたと考えられる。

5. 克服すべき課題と将来への展望

本研究の実施に当たり、次に示す課題が残されている。

(1) 航路航行操船における操船支援

本研究では状態変数表示に関する操船者の適応制御特性を利用して、操船者特性を向上させて良好な操船結果を得ることを試みた。そのために、操船者が正確かつ容易に状態変数を確認することができる表示画面を考案した。このような表示画面を使った操船シミュレータ実験を行って表示効果の確認を行った。その結果、大型船、小型船のどちらも回頭角速度を表示することによって系の安定性を保ちつつも横偏位量を最小とすることが可能となった。したがって、本研究で考案した状態変数としての回頭角速度表示画面により、航路航行操船における操船者特性が改善され得ることが示された。

しかし、この回頭角速度表示画面は従来の回頭角速度の表示とは一線を画す方法であるため、本研究では限られた操船者についてのみ対象としたが、さらに多くの操船者によるこのような表示画面の受け入れ易さについて調べる必要があると考えられる。

(2) 避航操船における操船支援

本研究では他船動向について操船者がどのような影響を受けるかを調べるために単純な 2 船間の見合い関係を調査対象とした。この理由は、複雑な見合い関係も基本的には 2 船間の見合い関係の連続として扱うことができると考えられるからである。

本研究では、このような前提の元に基本的な 2 船間の見合い関係において、他船動向の不確定性を確定化する表示を考案した。その結果、他船の予定変針点表示の有効性が操船シミュレータによる実験から示された。これは、他船動向の不確定性が操船者の情報処理の中で情報解析と意思決定に与える影響を本研究で考案した他船の予定変針点表示画面により排除することができることを意味している。

これらのことから、幅狭海域における複雑な見合い関係においても基本的には 2 船間の関係として他船の予定変針点表示画面の有用性は推し量ることができるが、自船が他船を避航後、自船の避航行動が当該他船以外の他船動向に影響を与える相互の連鎖作用については、さらに詳しく調べる必要があるものと考えられる。

(3) 共通

実船への搭載についての考察が必要である。すなわち、実船に搭載する際、操舵による船体の運動量の操船支援システムへの供給方法、他船からの予定変針点の取得方法、自船の設定航路線（予定変針点）の入力方法等を明確に整理する必要がある。

また、本研究では航路航行操船と避航操船の操船支援実験を操船シミュレータにおいて実施したが、被験者は全てが熟練航海士、船長であった。これは、一般的な

支援システムの目的である初心者に対して支援効果があることを確認していないことを意味する。

したがって、本来の意味における支援効果の確認を初心者、つまり、学生を対象として行う必要がある。

これら、残された課題を解決することで、より説得力があり、かつ、実用性を有する操船支援システム開発を行うことが可能となると考えられる。

さらに、本研究の成果をもとに人工知能的手法を利用することで操船支援システムのエージェント化が進められ、より操船者の側に立った操船支援システム開発が進められるものと考えられる。

6. 謝辞

本研究を実施するにあたり、研究テーマ選定から始まり、6年間の研究の全期間において辛抱強くご指導を賜りました小林弘明教授に深謝いたします。また、操船シミュレータ実験を実施するに当たり、様々なご支援をいただいた石橋篤講師にも感謝いたします。

また、私と机を並べて勉学に励んだ博士後期過程および(株)商船三井の水野弘之氏には船長の立場からの貴重な助言をいただき、また、貴重な時間を割いて操船シミュレータ実験の被験者を快く引き受けて頂いたことを感謝いたします。

さらに、操船シミュレータ実験において実験設定、被験者と自分の時間を割いて快く手伝ってくださった博士前期過程の学生および海上保安庁の西村智久氏にも深く感謝いたします。

また、(株)商船三井の仙田晶一氏には公私共に多忙な中、貴重な休日を割いて操船シミュレータ実験の被験者を快く引き受けていただいたことを感謝いたします。

また、全ての操船シミュレータ実験の被験者を引き受けていただくと同時に、本実験の前の確認にも手伝っていただいた博士前期過程の学生である向真也君にも感謝いたします。

また、6年間、陰になり日向になりともすれば挫けそうになる私をずっと、支えてきてくれた私の家族、妻佐知子、母キヌ子、3人の子ども達、拓洋、愛子、史也にも感謝いたします。

ここに挙げた人たちの協力がなければ、本研究を達成することは困難でありました。重ねて深謝いたします。

最後に志半ばで無念にも急逝した私の亡父、遠藤文一に本研究を奉げます。

参考文献

1. 操縦性能変換装置とその性能
著者：松木 哲、烏野 慶一、奥村 宗行、北村 寿英
関西造船協会誌
関西造船協会
第 170 号 pp19－33
昭和 53 年 9 月
2. 第 175 研究部会 加減速時における操船性能に関する研究報告書
著者：社団法人日本造船研究協会
pp144－182
昭和 53 年 3 月
3. 航路航行操船における操船者特性の研究
著者：小林 弘明、中川 紀美子
日本航海学会論文集
日本航海学会
第 78 号 pp63－71
昭和 63 年 3 月
4. 操船情報と操船能力について
著者：小林 弘明
日本航海学会論文集
日本航海学会
第 88 号 pp41－48
平成 5 年 3 月
5. 操船技術の要素技術展開について
著者：坂口 泰弘、ほか
日本航海学会論文集
日本航海学会
第 96 号 pp119－125
平成 9 年 3 月
6. 操船シミュレータによる教育・訓練法の提案
著者：遠藤 政利、ほか
日本航海学会論文集
日本航海学会
第 96 号 pp127－137

平成 9 年 3 月

7. A Study of Maneuvering Support System Based Upon Human Characteristics
Author: Masatoshi Endo, Hiroaki Kobayashi
INSLC2002
Conference Proceedings CD-ROM 格納
July, 2002
8. A Study of Maneuvering Support System Taking Human Characteristics into Consideration
Author: Masatoshi Endo, Hiroaki Kobayashi
Japan and Korea Workshop on Marine Simulator and Simulation Research, Proceedings
日韓海事シミュレータ会議
pp139-152
August, 2002
9. A Human-Centered Maneuvering System Based Upon New Concept
MARTEC Conference Proceedings
MARTEC2002
pp18-1-18-20
September, 2002
10. 船体と海洋構造物の運動学
監修：元良 誠三
成山堂
11. 船舶操縦に関するシミュレータの活用
第 1 回操船シミュレータセミナー
日本航海学会操船シミュレータ研究会
平成 9 年 1 月
12. 航行安全とシミュレータ
第 2 回操船シミュレータシンポジウム
日本航海学会操船シミュレータ研究会
平成 12 年 2 月
13. AIS（自動識別通報装置）
著者：近藤 信竹
日本造船学会誌
日本造船学会
第 851 号 pp297-301

平成 12 年 5 月

14. 仮想海上交通センターによる航海支援システム

著者：長谷川 和彦、田代 剛、立川 功二

関西造船学会春季講演会論文集

関西造船協会

pp75－79

2001 年 5 月

15. IMO, Annex2 Draft assembly resolution on Guidelines for the onboard operational use of ship borne automatic identification systems(AIS)

16. 古野電気株式会社 船舶自動識別システム Model FA-100 仕様書

17. 制限された状況における船体運動制御の操船者特性に関する研究

著者：仙田 晶一

東京商船大学大学院商船学研究科学位論文

東京商船大学

2001 年 3 月

18. JIS-Z8518 「人間工学－視覚表示装置を用いるオフィス作業－表示色の要求事項」